

Informe glifosato

Cómo el glifosato ha inundado la biosfera
y está contribuyendo a la crisis de biodiversidad y a
la pérdida de esperanza de vida humana

Álvaro G. Molinero



INFORME GLIFOSATO

**Cómo el glifosato ha inundado
la biosfera y está contribuyendo
a la crisis de biodiversidad y a la
pérdida de esperanza de vida humana**

Álvaro G. Molinero

[Al margen]

La editorial de



**LIBROS
EN ACCIÓN**



Consejo Editorial de Libros en Acción:

Miguel Brieva, Fernando Cembranos, Elena Domingo, Belén Gopegui,
Valentín Ladrero i Quino Miguélez

Título: informe glifosato. Cómo el glifosato ha inundado la biosfera
y está contribuyendo a la crisis de biodiversidad y a la
pérdida de esperanza de vida humana

Autor: Álvaro G. Molinero

Coberta: Andrés Espinosa.

Edita: Libros en Acción (la editorial de Ecologistas en Acción)
C/ Peñuelas, 12, local izq. 28005 Madrid
www.ecologistasenaccion.org

Primera edición: Octubre 2025

© Ecologistes en acció i autors

ISBN: xxxxxxxxxxxxx

Depósito legal: M-xxxxxxx

Impreso en papel 100% reciclado, blanqueado sin cloro

Ecologistas en Acción agradece la reproducción y divulgación
de los contenidos de este libro siempre que se cite la fuente.



Este libro está bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Compartir
bajo la misma licencia 3.0 España de Creative Commons.
Para ver una copia de esta licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>

Índice

Algunos posicionamientos previos.....	7
Introducción	11
Origen, acción y producción de glifosato.....	11
Glifosato y Surfactantes (POEA).....	15
El ácido aminometilfosfónico (AMPA) y los tiempos de desintegración del glifosato.....	17
Distribución del glifosato por los ecosistemas. Prevalencia y concentración: suelo, acuíferos y masas de agua superficiales.....	19
Glifosato y productividad agrícola.....	24
¿A qué concentraciones suele encontrarse en animales y en los humanos?.....	39
Situación legal del glifosato en el mundo.....	41
El ecosistema edáfico	49
Introducción al ecosistema edáfico y su importancia en la agricultura.....	49
Microorganismos bacterianos y glifosato.....	56
Fauna edáfica y Glifosato.....	73
Los ecosistemas acuáticos	91
Ecosistemas acuáticos y biodiversidad.....	91
¿La producción primaria en juego? Plancton y glifosato.....	93
Distribución y efectos del glifosato en la columna de agua.....	101
Ecosistemas marinos.....	111
Arrakis.....	118
Ecosistemas terrestres	121
Los líquenes como “ecosistema modelo” que muestran la capacidad disruptiva del glifosato.....	121
Los vertebrados terrestres también se ven afectados por el glifosato.....	126
Polinizadores y el glifosato como una parte de importante del gran problema ecológico que afrontamos.....	153
Otros Artrópodos: mariquitas, crisopas o colémbolos.....	164
Glifosato y sus efectos sobre el sistema nervioso de mamíferos.....	167
El desarrollo temprano del sistema nervioso.....	170
La comunicación entre neuronas.....	173
Efectos sobre el comportamiento.....	176
El estrés oxidativo y sus efectos sobre la muerte neuronal.....	176
Conclusiones.....	179
Los humanos	183
El caso “Lee” Johnson y la epidemiología demuestran que el glifosato es carcinogénico.....	186
Epidemiología del Parkinson y efectos sobre el sistema nerviosos de los herbicidas en base a glifosato.....	190
Alteración del microbioma intestinal humano debido a la exposición al glifosato y sus efectos sobre la salud.....	194
El glifosato es un disruptor endocrino en humanos.....	196
<i>The Monsanto Papers</i> revela el Espionaje de Bayer-Monsanto y la guerra sucia contra el ciudadano organizado.....	200
El asunto Séralini. Ejemplo de <i>lobbying</i> en la ciencia.....	206
Las cartas al editor de Food and Chemical Toxicology.....	208
Las respuestas a las críticas: cómo una simple revisión rápida puede tumbar a nivel argumental una campaña mediática.....	234
Evaluación del Glifosato como un herbicida seguro.....	237
Epílogo	243
Referencias.....	247

Algunos posicionamientos previos

Antes de comenzar una lectura es bastante útil que el autor del texto explique brevemente qué va a encontrar el lector en el mismo y algunas de las particularidades que le han llevado a su escritura. Es también útil que explique la estructura del texto y algunas decisiones que ha tomado a la hora de seleccionar la información incorporada. Siempre es más honesto explicar las decisiones que se toman para realizar un texto que no hacerlo.

Este es un texto que se basa en la forma que tenía de entender la relación entre capital, ciencia y tecnología el filósofo Javier Echeverría. La ciencia no es solamente un método (o una forma de pensar como diría Carl Sagan), sino que es una actividad social inserta en un contexto dominado por la reproducción del capital. Esto, en las sociedades de posguerra (es un proceso que se aceleró tras la Segunda Guerra Mundial, pero que venía dándose desde el siglo XIX), cambia el proceso de investigación científica y lo convierte en una herramienta más del tenedor de capital para garantizar sus inversiones. La investigación va guiada hacia un determinado objetivo crematístico (una patente, por ejemplo) y no hacia cualquier campo del conocimiento que esté por descubrir. Está enfocada hacia el control y la producción de tecnología. Esta investigación guiada suele hacerse con financiación pública y posteriormente aplicada por la iniciativa privada. El glifosato es una tecnología más al servicio de la reproducción del capital y no un útil agrario neutro que podemos utilizar a conveniencia en cualquier sistema productivo imaginable.

Este texto es, además, un texto posicionado. En ningún caso se va a tratar de mantener el relato cínico de la neutralidad y de la equidistancia: “unos dicen que el glifosato es tóxico y otros no”. Para este tipo de documentos, busquen en otro lado. La evidencia habla por sí misma. Las revisiones sobre el asunto son claras. Y, sin embargo, los decisores públicos y la opinión producida por la élite de la divulgación científica en castellano (y, en general, en casi cualquier idioma) nos dicen que el herbicida más usado en el mundo (cuya empresa fabricante por excelencia, Bayer-Monsanto, afronta demandas por valor todavía de más

de 50.000 millones de dólares a fecha de agosto de 2024) es seguro y que, por ello, prolongan las licencias para su uso agrícola. ¿Qué explica esta paradoja?

Este texto nace de la hipótesis de que, también la investigación científica (como parte de la tecnociencia y, por ende, de la sociedad en la que vivimos) está sometida a los cambios en la comunicación que se están viviendo en los últimos años. Postverdad, *Fakenews*, hechos alternativos o polarización son algunos de los conceptos que la sociología y las ciencias políticas han acuñado para intentar describir el fenómeno. Un fenómeno, en cualquier caso, basado en el predominio de los relatos por encima de los hechos. Nada nuevo en las sociedades humanas, por otro lado. Y es aquí donde este texto tiene algo que decir. También se trata de construir un relato, en base a la múltiple evidencia disponible, que derrote el relato del gran capital sobre la supuesta seguridad de las sustancias bioactivas que fabrican.

Además, este texto se posiciona de otra manera en cuestiones relativas a la igualdad. Se ha seguido una forma de cita de referencias algo heterodoxa. La historia de la ciencia está plagada de historias increíbles que, en muchos casos, ocultaron, desacreditaron y despreciaron el trabajo realizado por las mujeres. Hasta donde se ha podido investigar, en este texto se ha citado el nombre completo de la autoría de un determinado estudio en el caso de que este hubiese sido firmado por unas mujeres y se ha optado por citar solamente el apellido en el caso de los hombres. Esta heterodoxia no se ha seguido si lo que se hace es narrar un suceso, un descubrimiento o en los casos de *lobbying* que se van a ir tratando, donde se ha citado el nombre completo en cualquiera de los casos. Esto se ha hecho así porque, como se podrá comprobar en el texto, la oposición a la investigación en toxicología suele estar encabezada por varones (varones mayores, fundamentalmente), mientras que la gran mayoría de la investigación toxicológica está encabezada por mujeres. Esto se ve especialmente bien en el llamado “asunto Séralini”.

El autor, además, comprende el mundo bajo el prisma de lo complejo. Los organismos vivos son sistemas biológicos complejos. Por ello, cuando una sustancia interactúa con la globalidad de las reacciones qui-

micas que en él se producen, no podemos pensar en términos lineales ni simples. La causalidad será siempre compleja. Podemos encontrar que una sustancia determinada tenga un efecto (A) a una determinada concentración y encontremos que a una menor concentración este efecto disminuye (pensamiento lineal), aumenta (reacción no lineal), o cambiamos a otro efecto (B).

En cuanto a la estructura, se ha optado por la tradicional (aunque falaz) *Scalae naturae*, en englobando los organismos eso sí, en ecosistemas. Así, en el primer capítulo se hace una revisión del panorama actual del glifosato. Es la *Big Picture*. ¿Cuánto se produce? ¿ayuda a incrementar la productividad agrícola? ¿en cuánta concentración podemos encontrarlo en diferentes ecosistemas? ¿cuál es el panorama legal en el mundo en cuanto a su aplicación y comercialización? ¿quién decide sobre la legislación del glifosato?

En un segundo capítulo se trata el ecosistema edáfico, donde se describe el suelo como ecosistema y se describen los efectos del glifosato sobre los organismos más pequeños de nuestro planeta (bacterias, hongos, protistas y algunos invertebrados), entrando en detalle sobre efectos específicos sobre una especie (o un grupo de especies), sobre efectos no lineales y a nivel de ecosistema. En un tercer capítulo exploremos a estos mismos organismos diminutos pero en los ecosistemas acuáticos. Veremos efectos complejos sobre las poblaciones de plancton y sobre organismos acuáticos de agua dulce y agua salada. También comenzaremos a comprobar que, incluso en invertebrados, el glifosato es capaz de actuar como disruptor endocrino. En el cuarto capítulo, y ya “subiendo” por esa “complejidad” de la vida, analizaremos los efectos del glifosato sobre los organismos terrestres, tanto invertebrados como vertebrados. A los responsables científicos del capital agroindustrial no les suele gustar la verdad: la fisiología básica de los animales es más o menos igual en todos los grupos. Compartimos mucha de la maquinaria molecular básica con una estrella de mar o con un nemátodo. Confirmaremos la acción como disruptor endocrino del glifosato, así como su potencial carcinogénico y genotóxico. En el quinto y último capítulo, nos centraremos en los seres humanos. Y no solamente hablaremos de daños sobre la salud. Buena parte del capítulo está dedicado a una de

las actividades humanas por excelencia: la política. En otras palabras: hablaremos de *lobbying*, del caso Séralini y otros precedentes, de cómo las agencias europeas están completamente contaminadas por procesos de cooptación provenientes del gran capital (puertas giratorias) o de los llamados *The Monsanto Papers* (y el cáncer linfático). También hablaremos de los efectos disruptores del glifosato sobre la microbiota intestinal (y su relación con desórdenes de la salud) y su efecto disruptor endocrino (y su relación con el cáncer).

¿Por qué esta estructura? Se ha optado por la *Scala naturae* por ser pedagógica pero el autor de estas líneas es completamente consciente de que no existen organismos superiores ni inferiores; que la complejidad no es el objetivo de la evolución ni que existe una tendencia hacia la misma (capítulo 1). Sin embargo, nuestra educación (formal y mediática) ha optado siempre por presentar a la naturaleza mediante esta escalera de complejidad. De hecho, como ya he insinuado, uno de los principales argumentos de las grandes empresas cuando alguno de sus productos son sospechosos de causar daños sobre la biota, es inmediatamente separar a seres humanos del resto: “si bueno, hay algunos pececillos que mueren, pero para humanos es plenamente seguro y, además, algo habrá que comer, ¿no?”. Es una distinción que nuestro cerebro entiende intuitivamente. Por ello, para eliminar complejidad del análisis, he seguido la misma estrategia. Y, sin embargo, cuando se acaba la lectura del texto (espero) queda bastante claro que los efectos del glifosato sobre casi cualquier forma de vida son similares y que, por tanto, lo que afecta a una bacteria puede afectarme a mí ¡Narices, si tengo más células bacterianas que mías propias en mi cuerpo! ¿cómo no va a afectarme?

Agradezco profundamente la colaboración de Cristina, mi compañera de vida, y a Garbí (el futuro), su paciencia durante la realización de este texto. Además, Cristina ha colaborado en la información relativa a los reglamentos internacionales sobre pesticidas. Agradezco también al colectivo “La Paradoja de Jevons”, integrado por Javi, Javier, Ana, Víctor, Alfredo, Sergio, María, Alex, Lorena, @tank_11 y Saray, sus múltiples correcciones en los artículos que hemos publicado conjuntamente en El Salto Diario y que han servido de base para alguna de las partes de algunos capítulos.

Introducción

Origen, acción y producción de glifosato

Lete era una ninfa de uno de los ríos del Hades, el inframundo en la mitología griega. Era una náyade que personificaba el olvido. Si bebías agua del río que Lete protegía te olvidabas por completo de todo. Así, antes de regresar de nuevo al mundo ya reencarnadas, las almas bebían éste agua del sistema hídrico del Hades y olvidaban sus vidas pasadas.

El ser humano parece empeñado en beber todos los días del río Lete: cuando desarrollamos tecnologías y las aplicamos, en un contexto socioeconómico determinado, se nos olvida tener en cuenta todas las posibles consecuencias que su implementación puede tener. El glifosato, como eficaz herbicida, no iba a ser menos. A lo largo de este texto vamos a examinar muchos de los efectos no deseados sobre la biodiversidad y sobre la salud humana del plaguicida más producido y aplicado en nuestro planeta. Empecemos por el principio. ¿Qué es el glifosato, cómo actúa y cómo ha llegado a convertirse en la estrella de la industria agrícola?

Estructuralmente, el glifosato es una molécula bastante sencilla. Se puede formar por la unión de la glicina (uno de los 20 aminoácidos esenciales¹) y un grupo metilo que contiene fósforo y dos grupos alcohol (o grupo fosfonometilo), unidas ambas unidades químicas a través del nitrógeno de la glicina. Veremos que esta molécula la producen, de forma natural, un pequeño grupo de bacterias.

La mejor forma de comprender cómo actúa es conocer el argumento más utilizado en favor de su uso comercial: el glifosato tiene una muy baja toxicidad en vertebrados. La base empírica de este argumento nos lleva directamente a definir dónde y cómo actúa. Y también nos llevará

¹ Los aminoácidos esenciales son los 20 aminoácidos que forman parte, de forma prácticamente universal a toda la vida, de las proteínas.

a ver que, tras una fina capa de veraz pintura, se esconde una profunda falacia de consecuencias globales.

Esta molécula es capaz de actuar sobre una ruta metabólica específica, de nombre bastante extraño, que utilizan muchos organismos para sintetizar aminoácidos aromáticos². Estos aminoácidos, en concreto la tirosina, el triptófano y la fenilalanina, forman parte de los llamados aminoácidos esenciales. Sin estos aminoácidos, el organismo acaba muriendo. Así, gracias a esta ruta de síntesis de aminoácidos aromáticos, los organismos que la utilizan pueden obtener estos eslabones proteicos que, de otra manera, debería obtener por otras vías. Esto, en biología, suele significar depredación.

De hecho, los vertebrados no sintetizamos estos aminoácidos. No tenemos una ruta metabólica específica para estos aminoácidos aromáticos. Vamos a ponerle nombre ya a esta ruta: la ruta Shikimática. Recibe este nombre (como tantas otras rutas bioquímicas) en honor al primer compuesto con el que se inicia, el shikimate. Este compuesto es básicamente un anillo aromático con 4 grupos alcohol asociados³. Permittedme que me adentre un poco más en esta ruta. La primera reacción es la más importante en lo que respecta al glifosato: el *shikimate* se activa y se carga con dos carbonos que provienen de uno de los compuestos más importantes de la bioquímica celular, el piruvato⁴, para formar un compuesto químico que podrá dar lugar a estos tres aminoácidos aromático. Ya hemos llegado al punto clave. El glifosato bloquea el enzima que realiza esta reacción: la EPSE sintetasa (el en-

2 Hay bastantes revisiones sobre el funcionamiento bioquímico del glifosato sobre la ruta Shikimática o ruta Shikímica. Una buena recomendación es Helander *et al.* (2012).

3 Los anillos aromáticos son estructuras cíclicas con base en el elemento carbono muy flexibles desde el punto de vista estructural y, por tanto, son capaces de dar lugar a sustancias con diferentes propiedades con mínimos cambios en su estructura. En biología son muy importantes. La hemoglobina o la clorofila son sustancias que se construyen, también, en base a anillos aromáticos.

4 O ácido pirúvico. El piruvato es el producto final de la glucólisis. Esta es una ruta metabólica central en la vida. Es básica para muchos microorganismos, obteniendo energía metabólica (ATP) de forma rápida, y el piruvato es el inicio de otras rutas metabólicas para obtener energía en eucariotas, como el ciclo de Krebs, además de constituir la base química para la síntesis de otros muchos compuestos estructurales para la vida.

zima cataliza la reacción de adición del piruvato al *shikimate*). Así, los organismos expuestos a glifosato, no pueden sintetizar estos eslabones de proteínas y son incapaces de sobrevivir.

John E. Franz en 1970, que había leído previamente algunos informes de Henri Martin (empleado de una pequeña compañía farmacéutica Suiza) sobre cómo aislar y sintetizar esta molécula capaz de detener una ruta bioquímica esencial, trabajaba para Monsanto. Se dio cuenta que todas las plantas dependían de la ruta Shikimática para sobrevivir. Así que se puso manos a la obra para obtener un producto comercial capaz de actuar como herbicida y que sirviera para la emergente agricultura industrial. El mercado disponible era impresionante: los herbicidas de los años 1980 apenas llegaban a una mortalidad del 40% en las plantas sobre las que se aplicaba⁵.

Con el glifosato la mortalidad era prácticamente total. En 1974 Monsanto patentó la molécula y el producto comercial. En 2016 el mercado de esta molécula ya liberada de su patente (no así el Roundup, producto comercial en base a glifosato comercializado por Bayer-Monsanto), y con más de 20 marcas distintas y muchas más formulaciones comerciales, ascendió a casi 24.000 millones de dólares, alcanzando los 34.000 millones en 2022.

Pero hay un problema. Si se va a utilizar el herbicida como tratamiento fitosanitario en los campos donde se va a cultivar trigo, soja, algodón o berenjenas, ¿no matará este glifosato también a estas plantas de interés? Hasta 1990 lo único que podían hacer los agricultores era tratar previamente los campos con glifosato, en elevadas concentraciones, y esperar después que, durante el crecimiento de su cultivo, las mal llamadas “malas hierbas” no crecieran demasiado y compitieran con las sus “buenas hierbas”. A partir de la década de 1990 se desarrollan los cultivos transgénicos.

Una de las primeras plantas transgénicas que se patentaron fue la soja resistente al uso del glifosato. Un ejemplo es la *Soja RR* o “Soya Roundup

5 En Duke y Powles (2008) encontramos una minirevisión del glifosato que es muy útil para introducirse, tanto en el origen histórico, como en la extensión de la contaminación por glifosato en el planeta, así como los efectos sobre la biodiversidad y los seres humanos.

Ready”, también de la compañía Monsanto⁶. ¿Y cómo lograron esto? Utilizando la sabiduría acumulada por millones de años de evolución. Es bastante raro en biología que no existan excepciones a la regla ¿Existía en la naturaleza una EPSE sintética capaz de resistir la acción del glifosato cuya secuencia de nucleótidos se pudiera incorporar con éxito a nuestra planta de interés y hacerla, así resistente al glifosato? Pues, efectivamente, sí. El género de bacterias *Agrobacterium* la posee. Fue este enzima, y no otro, el que los diseñadores de los organismos modificados genéticamente (OMG) utilizaron para crear esas primeras plantas transgénicas. La idea básica es relativamente sencilla: mi variedad de planta resiste al herbicida mientras todas las demás plantas consideradas no útiles, mueren porque son incapaces de sintetizar aminoácidos aromáticos.

Y es justo en este momento cuando, tanto para los “emprendedores” y empresarios, como para las autoridades reguladoras, periodismo y clase política se aparece Lete y les ofrece agua del río Hades. Y así es como todo el mundo olvidó sus vidas pasadas. ¿Nadie se preguntó si algún organismo más, a parte de las plantas, poseía la ruta Shikimática para sintetizar el triptófano, la fenilalanina y la tirosina? Efectivamente, nadie lo hizo, o se consideró que, a las concentraciones a los que se utilizaba, no pasaba absolutamente nada porque los vertebrados simplemente tienen que obtener sus aminoácidos aromáticos de la dieta. No tenemos ruta Shikimática. Somos incapaces de sintetizarlos. Esto, pese a suponer una desventaja evolutiva aparente, nos iba a salvar de que el glifosato nos envenenara.

Sin embargo hay unos organismos que viven con nosotros, con las plantas y con la mayor parte de seres vivos del planeta para los que el glifosato es, también, un potente veneno: las bacterias. Además, el glifosato ha demostrado tener otra serie de efectos no esperados sobre las células de vertebrados e invertebrados. La sustancia que vino a facilitar la disponibilidad de alimentos (pero sobre todo a llenar los bolsillos de unos pocos inversores gracias a la creación de un monopolio de facto en la agroindustria americana), se ha mostrado en realidad como un tóxico de primera magnitud.

6 Cuhra (2015) ha revisado el modelo regulatorio del producto Soja RR mostrando los fallos en EE.UU. y Europa. Dice literalmente que se “han ignorado sistemáticamente cuestiones y pruebas de importancia para la evaluación regulatoria”.

Glifosato y Surfactantes (POEA)

El glifosato no viene solo. Para que este herbicida pueda actuar, debe penetrar en el interior celular y actuar sobre el enzima EPSE sintética. Y, para penetrar en una célula, primero tienes que entrar dentro del organismo.

Todas las plantas tienen una epidermis, denominada cutícula, que es bastante impermeable a la mayor parte de sustancias hidrosolubles y a la propia agua. Esto tiene mucho sentido. Uno de los principales objetivos de una planta es ser muy eficiente en el uso del agua. Esto implica, en muchos casos, la secreción hacia esta cutícula de ceras y aceites que dificulten el intercambio de vapor de agua hacia el exterior, evitando la pérdida de tan preciado bien. Además, estas ceras y esta cutícula, defienden a la planta de depredadores e infecciones que puedan atacarle desde el exterior. El glifosato es una sustancia hidrosoluble por lo que lo tiene bastante complicado si quiere penetrar dentro de una planta. Para esto los fabricantes de preparados comerciales en base a glifosato (como el ya mencionado Roundup[®]) desarrollaron surfactantes (o tensioactivos). En pocas palabras, un surfactante es una sustancia química que separa en pequeñas gotas los aceites y ceras de las cutículas vegetales, permitiendo una emulsión en agua y, así, haciendo posible la penetración del glifosato dentro de la planta.

El tensioactivo más utilizado (prácticamente el único utilizado) en las preparaciones comerciales de glifosato es la polietoxilamina o POEA⁷ (de *Polyethoxylated tallow amine*). Se obtiene de grasas animales y puede llegar a constituir entre el 15 y el 21% en peso del preparado comercial concentrado en base a glifosato (no suele superar el 1% en la formulación final para su uso).

¿Y por qué es tan importante conocer que los preparados de herbicidas llevan surfactantes? Porque en el caso del glifosato muchas veces la toxicidad del producto comercial es debida a ambas sustancias:

7 También conocido como MON0818, es el surfactante de los siguientes productos comerciales en base glifosato: Aquamaster[®], Filedmaster[®], Touchdown[®], Glyphos[®], Duramax[®], Durango[®], Glyphomax[®], Fosato[®], Ron-do[®], Vision[®], Rodeo[®], Sulfosato y el archiconocido Roundup[®].

glifosato y POEA. Por ejemplo, en algunos trabajos recogidos por Pérez *et al.* (2011) se muestra que la toxicidad para especies de algas diatomeas del género *Skeletonema* la toxicidad del producto comercial se la repartían, desde un 45-55% para el POEA y el glifosato respectivamente, hasta un 85-15% en el caso de *Selenastrum capricornutum*. Recogen, además, otras investigaciones donde el Roundup® llega a tener 4 veces más toxicidad que la sal de glifosato preparada en laboratorio (sin coadyuvante, por tanto) en la fanerógama *Lemna minor*. Como veremos, estos efectos negativos de los preparados comerciales sobre la flora y el fitoplacton que no es la diana de tratamiento de la industria agraria son unas de las principales externalidades del uso del glifosato. Podemos pensar que con la aplicación a la concentración a la que recomienda el fabricante no estamos produciendo ningún daño, siempre y cuando tomemos las medidas adecuadas (tanto de seguridad individual como de seguridad ambiental). Sin embargo, vamos a ir viendo como mínúsculas cantidades de glifosato o de preparados comerciales en base a glifosato pueden hacer variar, por ejemplo, la composición poblacional del fitoplacton de una pequeña laguna, de un río o incluso de las aguas litorales de nuestros océanos. Otros trabajos han encontrado que el POEA es entre 2,4 y 5,8 veces más tóxico para bacterias y ciliados que el propio glifosato (Tsui & Chu, 2003).

A efectos prácticos, hablaremos muchas veces de glifosato, pero en la mayor parte de trabajos en realidad están estudiando los efectos del preparado comercial. Esto es lógico: lo que va a parar a nuestros suelos, a nuestras aguas, aquellos que se queda sobre las verduras que nos comemos, aquello que cae sobre los animales que viven en el suelo, sobre las plantas y que viven en las proximidades del campo tratado es un preparado comercial en base a glifosato (en muchas ocasiones, Roundup®).

Sin embargo consideramos esencial distinguir ambos compuestos porque lo que parece confirmar la literatura científica disponible es que el surfactante es más peligroso. Esta información debería ser recogida por las autoridades regulatorias y valorarla en la justa medida. Suponemos también que esta información es conocida por las empresas productoras de productos en base a glifosato, sobre todo

por Bayer-Monsato y que tendrán alternativas trabajadas ya para una posible prohibición, igual que parece que están trabajando para producir una alternativa al glifosato: otra molécula capaz de detener la ruta Shikimática.

En 2019, Brilisauer y colaboradores del Instituto de química orgánica *Eberhard Karls* de la Universidad de Tübingen (Alemania) ya encontraron esta molécula: la (7dSh) o 7-desoxi-pseudoheptulosa⁸.

El ácido aminometilfosfónico (AMPA) y los tiempos de desintegración del glifosato

Ni el glifosato viene solo (como hemos visto) en el producto comercial destinado a la erradicación de “malas hierbas”, ni el glifosato desaparece sin más del medio ambiente. Pasa por un proceso de degradación. Es por ello que, para ser rigurosos, deberíamos distinguir, al menos, tres niveles analíticos: I) el principio activo o glifosato, II) los coadyuvantes que alargan la estabilidad y la vida de la solución comercial y permiten un mejor tratamiento y, III) los productos de degradación del glifosato.

El glifosato tiene dos caminos básicos a seguir una vez son vertidos al campo: o bien es absorbido por los seres vivos, haciendo su efecto (o siendo incorporado al cuerpo del organismos y/o metabolizado, degradado y/o detoxificado) o bien pasa espontáneamente a formas más sencillas hasta su reaprovechamiento o degradación completa. Al ser básicamente una glicina, más un grupo metilfosfónico, la tendencia natural del glifosato es a escindirle por ese enlace que tiene al nitrógeno como protagonista y que las mantiene unidas, dando lugar a la propia glicina y al ácido aminometilfosfónico o AMPA.

8 En 2016 la empresa de matriz alemana Bayer compró por unos 66.000 millones de dólares Monsanto. Como hemos visto, el volumen de mercado anual del glifosato está en este orden de magnitud. Ha sido el propio ministerio para la ciencia, la investigación y las artes de Baden-Württemberg (Alemania) quien ha financiado esta investigación de la Universidad de Tübingen con su iniciativa “Glicobioteología”. La propia Universidad ha patentado la molécula 7dSh y derivados análogos.

La mayor parte del texto va a estar dedicado al glifosato, pero en muchos artículos que citaremos hacen un estudio tipo “caja negra”: se conocen los *inputs* al sistema (las cantidades de glifosato o preparado comercial equivalente aplicadas) y los *outputs* (efectos de la aplicación). En este tipo de trabajos es imposible determinar si el daño observado lo ha producido el producto comercial en su conjunto, el glifosato o el AMPA. Pero cuando ambos compuestos se han estudiado por separado para ver su toxicidad, se ha observado que el AMPA tiene un perfil toxicológico muy similar al glifosato, pero permanece más tiempo en el ambiente. Se presenta junto con el glifosato, pero puede tener orígenes diversos.

Sofia Guilherme y su equipo del departamento de biología de la Universidad de Aveiro (Portugal) se propusieron conocer un poco mejor la toxicidad del AMPA. En concreto estudiaron su genotoxicidad en la anguila europea (*Anguilla anguilla*), especie catalogada por la IUCN⁹ como en peligro crítico de extinción. Estudiaron los efectos del AMPA a 11.8 µg/L y 23.6 µg/L observando que los daños cromosómicos y los daños en el ADN se incrementaban espectacularmente. Esto no es para nada baladí. Como veremos, las concentraciones en las aguas de nuestros ríos y de nuestra costa puede contener estas cantidades de AMPA y, por tanto, conocer su concentración en un determinado río que sea utilizado por la anguila europea para completar su ciclo vital, puede ser esencial a la hora de conservar adecuadamente esta especie. En unas pocas palabras: el principal producto de la degradación del glifosato el AMPA, es genotóxico para una especie en peligro de extinción.

Pero además de conocer la toxicidad del AMPA, debemos saber cuánto permanece en el ambiente. En términos generales, el glifosato tiene un tiempo de vida medio en el ambiente muy corto comparado con otros productos destinados al incremento de la producción agraria, pero éste es sumamente variable. Por su parte, el AMPA tiene un tiempo de permanencia mucho mayor.

9 Jacoby, D. & Gollock, M. 2014. *Anguilla anguilla*. The IUCN Red List of Threatened Species 2014: e.T60344A45833138. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2014-1.RLTS.T60344A45833138.en>. Consultado el 9 de octubre de 2023.

Según Schuette, responsable de valoración del *Environmental Monitoring & Pest Management Department of Pesticide Regulation* de Sacramento cifra en 35 días el tiempo de vida medio en el agua, 22,1 días en suelos anaerobios, 96.4 días en suelos aerobios, 44 días en el campo como tiempo medio de disipación. Por su parte, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA por sus siglas en inglés) reconoce que, en el suelo labrado, el glifosato, y alguno de los compuestos en los cuales se degrada, como el AMPA, tienen un tiempo de permanencia elevado: se estima que el tiempo de vida medio en los suelos cultivados es de 143,3 días para el glifosato y 519,9 días para el AMPA. A lo largo del texto veremos otros factores que influyen en la vida media de ambos compuestos: actividad microbiana en el suelo, adsorción a las arcillas¹⁰, adquisición de la molécula por parte de los organismos, etc.

Distribución del glifosato por los ecosistemas. Prevalencia y concentración: suelo, acuíferos y masas de agua superficiales

¿Hasta qué punto es global el uso del glifosato? La soja transgénica en EE.UU y en muchos países de América latina, como Argentina o Brasil, supone un elevadísimo porcentaje del total. En el caso estadounidense hablamos de porcentajes superiores al 90% según el USDA¹¹. En Argentina se supera el 98% de la superficie cultivada. Por ejemplo, en la campaña 2022-2023 el SISA¹² informa que de las 13.773.695 hectáreas cultivadas con soja, 13.529.27 correspondieron

10 La adsorción, a diferencia de la absorción, es un fenómeno que se da en la superficie de un material. Se produce por la atracción física entre la molécula adsorbida y el material adsorbente.

11 Datos del NASS (*National Agricultural Statistics Service*), del USDA (*United States department of Agriculture*)

12 Sistema de Información Simplificado Agrícola, del Instituto Nacional de Semillas, perteneciente a la secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca del Ministerio de Economía

a soja transgénica resistente a glifosato (el 98,23%). Según la ISL¹³, Brasil dedicó el 96% de su superficie dedicada al cultivo de soja, a la producción de soja transgénica resistente a glifosato. Esto supuso más de 41 millones de hectáreas en 2022: tres veces más que Argentina.

En Europa, gracias a la movilización de la sociedad civil durante los años 1970, el ecologismo forma parte de la cultura política de buena parte de nuestras sociedades. Sin embargo, no vamos a ser inocentes. Las diferentes regulaciones de la Comisión Europea que protegen el mercado Europeo ante la entrada y, sobre todo, producción de OMG en suelo de la Unión Europea no responden a este ecologismo político de la sociedad europea (aunque políticamente se sustenten en él), sino que responden a una política mercantilista y proteccionista del mercado europeo¹⁴.

Una mirada somera sobre el mercado de herbicidas en Europa nos aporta más información. Entre Francia, Alemania y España consumen el 60% de todos los herbicidas de la Unión Europea. Este consumo supera los 100 millones de toneladas anuales¹⁵. De estos tres países, es España quien más glifosato consume (unos 11.500 millones de toneladas en 2021), tras Francia (unas 8.000) y Polonia (unas 4.500)¹⁶. Según Virginia C.

13 Instituto Soja Livre, una asociación de la sociedad civil brasileña, Fundada por la asociación de agricultores y productores de soja (Aprosoja) y la empresa Embrapa que “tiene como objetivo contribuir al desarrollo del mercado de Soja Convencional (llamada Soja Libre), manteniendo viva la libertad de elección de los productores rurales a la hora de elegir la tecnología, el cultivar y sistema de producción que aportará mayor rentabilidad y seguridad en la cosecha”.

14 El caso del coche eléctrico es paradigmático. La presidencia de la Comisión Europea está investigando los supuestos subsidios del gobierno chino a los coches eléctricos que entran en el mercado europeo y se estarían planteando aranceles para estos productos. Es otra forma de definir proteccionismo.

15 Un 30% de todos los pesticidas que se usan en la UE son herbicidas. Eurostat. (2022, mayo 2). *346 000 tonnes of pesticides sold in 2020 in the EU*. Eurostat. [https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220502-1], artículo del 2 de mayo de 2022, accedido por última vez el 22 de octubre de 2024.

16 Datos de Eurostat, tomados y divulgados por Emma Bonnem y Aníbal Maíz Cáceres para AFP (2023, 20 septiembre). ¿En qué países está limitado o prohibido el uso del glifosato? France 24. https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20230920-en-qu%C3%A9-pa%C3%ADses-est%C3%A1-limitado-o-prohibido-el-uso-del-glifosato.

Aparicio *et al.* (2013) el uso de productos comerciales en base a glifosato en Argentina se sitúa entre los 180 y los 200 millones de litros. En el caso del Estado español este uso en 2019 fue de más de 10 millones de litros, con un incremento del 45% con respecto a las cantidades usadas en 2011¹⁷.

Charles M. Benbrook, consultor privado con una compañía de consultoría privada afincada en Orlando (EE.UU.), ha recopilado en un artículo en *Environmental Sciences Europe* las tendencias y usos del glifosato en EE.UU., Europa y a nivel mundial. Dice en el texto que:

“A nivel mundial, el uso de glifosato se ha multiplicado casi por 15 desde que se introdujeron en 1996 los llamados cultivos genéticamente modificados tolerantes al glifosato Roundup Ready. Dos tercios del volumen total de glifosato aplicado en los EE. UU., entre 1974 y 2014, han sido fumigados sólo en los últimos 10 años. La proporción correspondiente a nivel mundial es del 72 %. En 2014, los agricultores rociaron suficiente glifosato para aplicar ~1,0 kg/ha en cada hectárea de tierra cultivada en Estados Unidos y casi 0,53 kg/ha en todas las tierras de cultivo en todo el mundo.”

La última parte es demoledora. Un poco más de medio kilogramo de glifosato por hectárea cultivada en el mundo. Asombroso. Con este nivel de consumo y conociendo que el tiempo de permanencia de esta sustancia, y del AMPA, en el medio natural es muy variable, ¿qué cantidad de glifosato encontramos en los ecosistemas? Hemos de tener en cuenta que la concentración mínima de uso agrario es de 10.000 mg/L, como por ejemplo recoge Clair *et al.* (2012).

Los datos para los cursos de agua dulce terrestres son normalmente bajos¹⁸, aunque en lugares y momentos concretos pueden encontrarse

17 Esta información, y otras relativas al estado español, han sido obtenidas de dos informes de Ecologistas en Acción: E“l glifosato, una plaga para la salud de nuestros ríos, el medioambiente y las personas”, de 2020 y “Contaminación por glifosato en el medio acuático”, de 2021.

18 Como se irá desarrollando a lo largo del texto, una concentración baja en términos estadísticos no quiere decir, necesariamente que es una concentración segura o no lesiva. Como veremos, muchas veces los efectos de un tóxico no dependen tanto de la concentración, sino del contexto de interacción.

picos elevados de concentración. Isabelle Giroux controló los niveles de glifosato en algunos puntos escogidos de aguas terrestres en Quebec (Canadá), del 2011 al 2014, y encontró concentraciones de entre 0,04 µg/L y 18 µg/L. Un estudio similar realizaron Helene Horth y Karen Blackmore en 2009 sobre un periodo de 10 años en Europa, detectando concentraciones entre 1,3 µg/L y unos elevados 370 µg/L. Otro trabajo sobre masas de aguas (que incluye a los acuíferos y el agua de lluvia), llega a conclusiones muy similares. W.A. Battaglin, y varias personas especialistas de diversos servicios geológicos estatales de Estados Unidos, llegaron a tres conclusiones sobre la frecuencia de detección del glifosato en las masas de aguas: I) la detección es frecuente, II) las medias observadas son bajas (del orden de 0,02-9,6 µg/L) y III) se detectan picos mucho más elevados en los lagos (de 301-427 µg/L) o en los ríos (73 µg/L) que en aguas subterráneas o en agua de lluvia (2,03-4,88 µg/L). Ecologistas en acción¹⁹ investigó en 2020 el caso concreto del Estado español. Tras sus análisis, llegaron a conclusiones muy similares a las de los demás estudios: un 7 % de las muestras rebasan el valor de 0,5 µg/L *“que las directivas de agua subterránea y de agua de boca e la UE consideran como el máximo permisible para la suma de todos los plaguicidas presentes”*. En dos muestras detectaron concentraciones de glifosato centenares de veces superiores al límite legal.

19 Ecologistas en acción es una de las organizaciones ecologistas más importantes del Estado español. Según sus principios fundacionales, que pueden leerse en su web, son *“una confederación de grupos ecologistas distribuidos por pueblos y ciudades. Formamos parte del ecologismo social, que entiende que los problemas medioambientales tienen su origen en un modelo de producción y consumo cada vez más globalizado, del que derivan también otros problemas sociales, y que hay que transformar si se quiere evitar la crisis ecológica”*. Tienen una gran cantidad de trabajos científicos realizados de forma independiente y de libre acceso.

¿Y en el suelo qué concentraciones encontramos? Vera Silva y sus colegas han investigado la distribución del glifosato y el AMPA en los suelos la Unión Europea. En conjunto vemos que más de 1/3 de los suelos (45%)²⁰ están contaminados por glifosato y/o por AMPA. El AMPA se detecta con mucha más frecuencia. Esto es coherente con su mayor estabilidad química. Hay diferencias geográficas en la detección de ambos compuestos. El glifosato detectado con una mayor probabilidad en el sur de Europa, lo que sugiere aplicaciones recientes y frecuentes, mientras que el AMPA se detecta más veces en zonas del norte: a mayor temperatura y sequedad, mayor degradación del AMPA. Esto también explica las diferencias. La concentración detectada para el glifosato por este trabajo osciló en el siguiente rango: 50-2050 µg/Kg. La mediana en este caso fue de 140 µg/kg. El AMPA osciló en un rango similar: 50-1920 µg/kg. La mediana fue muy similar: 150 µg/Kg.

Y ahora nos adentramos en el gran olvidado de nuestro planeta azul: el océano. Un producto tan universalmente utilizado no nos debe extrañar que sea, también, detectado en las aguas de nuestros mares y océanos. Ocurre, de hecho, con otro producto básico de nuestra civilización: el plástico²¹. Así, Mercurio y algunos colegas suyos del Instituto Australiano de Ciencia Marina han recopilado diferentes estudios sobre

20 En concreto, los análisis de detección y concentración se refieren a los primeros centímetros del suelo. Estos primeros centímetros son esenciales para la supervivencia de todas las especies de plantas porque allí vive una importante comunidad bacteriana y fúngica que interacciona, en muchas ocasiones, de forma mutualista con las plantas (como veremos). También hay una importante fauna, muy diversa, y que es esencial para el equilibrio ecosistémico: la edafofauna.

21 A principios de 2024 se produjo un vertido de más de 20 toneladas de “pellets” de Politereftalato de etileno con aditivo tinuvin 622 en las costas gallegas (España). Entre 2017 y 2024 han aparecido múltiples revisiones y estudios que sitúan la presencia de microplásticos en todos los lugares imaginables (agua, agua embotellada, alimentos, heces, orina, sangre, placentas, y en prácticamente todas las plantas y animales estudiados y en todos los lugares en los que se han buscado, incluida la Antártida) y que han revisado su peligrosidad para la salud humana y para la biodiversidad. Por ejemplo Nurshad Ali *et al.* (2023) afirman que *“la exposición a los microplásticos y nanoplásticos puede tener efectos sobre la salud a través del estrés oxidativo, la inflamación, la disfunción inmune, la alteración del metabolismo bioquímico y energético, la promoción de neoplasias, las alteración de las vías metabólicas [de nuestros simbioses] microbianos, el desarrollo anormal de órganos y la carcinogenicidad”*.

la concentración del glifosato en ecosistemas marinos²², además de haber estudiado cómo se comporta el glifosato y el AMPA en un medio marino. Las concentraciones en ecosistemas marinos son generalmente muy bajas (del orden de 1 µg/L), aunque como en el caso de las aguas continentales, esta concentración es muy variable y está sujeta a los vertidos que los ríos puedan descargar sobre los ambientes costeros y a la degradación de la molécula por parte de la comunidad bacteriana presente.

Precisamente es esto lo que más han trabajado Mercurio y su grupo. Han demostrado que el AMPA detectado en el medio costero procede, en su mayoría, de la degradación del glifosato por los microorganismos autóctonos presentes en la columna de agua y que el tiempo de vida medio del glifosato se alarga mucho con escasa o nula luminosidad. Estamos hablando de un tiempo de vida medio del glifosato de 47 días a 25 grados y con poca luz, alargándose a casi 1 año (315 días) en total oscuridad y a 31 grados. Extrapolando a partir de estos hechos: el glifosato sería capaz de permanecer un año en los sedimentos (y en la columna de agua cercana a estos) que se sitúen un poco más allá de los 150 metros de profundidad.

Glifosato y productividad agrícola

El uso global de OMG para resistir la aplicación del glifosato, y el uso de esta molécula como “herbicida preventivo” antes del cultivo de variedades no resistentes, ha sido justificado en multitud de ocasiones debido a la mejora de la productividad del cultivo y, por tanto, como una forma de garantizar que en este mundo pasa hambre cada vez menos personas. Podemos leer múltiples artículos de prensa y diversas justificaciones de proyectos de investigación científica que, por un lado ensalzan los incrementos productivos conseguidos gracias a la tecnología de las plantas transgénicas, y por otro lado critican ferozmente la oposición del movimiento ecologista a esta técnica²³.

²² El estudio, al igual que otros más recientes, reconocen que hasta el momento existen muy pocas cuantificaciones del nivel de contaminación por glifosato de las aguas costeras y otros ecosistemas marinos.

²³ Podemos leer, por ejemplo, un artículo del periodista científico Manuel Ansedé que,

Pero, ¿es cierto que los OMG han contribuido y contribuyen a una mayor seguridad alimentaria en nuestro planeta? La hipótesis es completamente legítima. Si en una determinada área de cultivo somos capaces de eliminar toda competencia para nuestras plantas, en teoría todo el abono y los nutrientes presentes naturalmente en el suelo quedan disponibles para ellas y, por ende, la producción por unidad de superficie debería ser mayor. El problema es que en biología no existe ningún problema con una solución tan sencilla.

Vamos a enumerar algunos problemas teóricos y empíricos a los que se enfrenta esta hipótesis. Un primer argumento podríamos resumirlo en el siguiente enunciado: no es necesaria la implementación de la agricultura basada en OMG porque la producción orgánica de alimentos a través de la agricultura es lo suficientemente productiva como para abastecer al planeta. Esto es un hecho. Lotter (2003) ya afirmaba que *“las reducciones de rendimiento de los sistemas de agricultura orgánica²⁴, en comparación con los de agricultura con-*

en 2016, entrevistaba al bioquímico español Luis Manuel Rubio sobre su proyecto de plantas capaces de producir nitrogenasa activa para eliminar o reducir mucho el aporte externo de abonos nitrogenados a los cultivos. El artículo es un ejemplo de manual de lo que se conoce como “technoptimismo” (una fe ciega en el progreso científico que tiende a despreciar los límites y complejidades del mundo natural que se necesitan comprender para alcanzar mejoras científicas reales y aplicables) y de dura crítica al movimiento ecologista utilizando la manida falacia del “hombre de paja”, poniendo el foco en la crítica que realiza parte del movimiento ecologista a los OMG sobre su seguridad, y descartando la crítica que se realiza sobre su impacto medioambiental, llegando a asegurar por parte de Rubio que *“tampoco se han hallado pruebas concluyentes de que provoquen problemas medioambientales”*. Como veremos en este texto, la afirmación es bastante osada. Ansedé, M. (17 de junio, 2016). Una ‘revolución transgénica’ para luchar contra el hambre en el mundo. *El País*. https://elpais.com/elpais/2016/06/15/ciencia/1465985562_778871.html

²⁴ Técnica productiva agrícola que, para la FAO es *“un sistema holístico de gestión de la producción que promueve y mejora la salud de los agroecosistemas, incluida la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo”*. Hace hincapié en el uso de prácticas de gestión con preferencia al uso de insumos no agrícolas, teniendo en cuenta *“las condiciones regionales requieren sistemas adaptados localmente. Esto se logra utilizando, cuando sea posible, métodos agronómicos, biológicos y mecánicos, en lugar de utilizar materiales sintéticos, para cumplir cualquier función específica dentro del sistema”*.

vencional²⁵, promedian entre 10% y 15%; sin embargo, generalmente se compensan con menores costos de insumos y mayores márgenes brutos. La conversión a gran escala hacia una agricultura orgánica no provocaría escasez de alimentos y podría lograrse mejor con una reducción del consumo de carne. Los sistemas agrícolas orgánicos superan consistentemente a la agricultura convencional en situaciones de sequía, superándolas en hasta un 100% [en productividad].”

También en los inicios de este siglo XXI, Catherine Badgley, y algunos colegas de la Escuela de medio ambiente y recursos naturales de la Universidad de Michigan (EE.UU.), modelaron un sistema productivo agrario en base a agricultura no biotecnológica y, en concreto, basado en agricultura orgánica. Concluyeron que *“los métodos orgánicos de agricultura pueden producir suficiente comida per capita para sostener la actual población humana y, potencialmente, una más numerosa, sin un incremento de la superficie cultivable (...)”* y que *“los datos en sistemas agroecológicos de climas templados y tropicales sugieren que los cultivos de cobertura de leguminosos pueden fijar suficiente nitrógeno para sustituir completamente los fertilizantes sintéticos que actualmente se usan”*.

Verena Seufert, y dos compañeros suyos de la Universidad McGill de Quebec (Canada), publicaron en la revista *Nature* conclusiones similares en 2012. Los rendimientos de la agricultura orgánica son generalmente más bajos que los de la agricultura convencional. Sin embargo, estas diferencias son altamente contextuales: bajo ciertas condiciones los sistemas orgánicos pueden casi igualar con los convencionales, mientras que en otras, en la actualidad, no puede hacerlo con diferencias en la productividad que pueden llegar a 1/3. Ponisio *et al.* (2015), en uno de los

25 Por agricultura convencional se entiende todo aquello que no es agricultura orgánica (o ecológica) y todo aquello que no es agricultura biotecnológica. Es decir, y en otras palabras, son un conjunto de técnicas, prácticas y costumbres agrícolas muy heterogéneas y que, para estudiarlas mejor, necesitan de una conceptualización mucho más clara. Para la persona que escribe estas líneas está claro que hay muchas prácticas agrícolas convencionales que claramente podemos enmarcar en un concepto de “agricultura sostenible”, es decir, la agricultura que permitirá en el futuro seguir produciendo alimentos para todo el planeta y que se adaptará a las limitaciones de combustible y fertilizantes que afrontaremos en los siguientes lustros. Las técnicas agrícolas intensivas en tecnología quedarían fuera de la sostenibilidad.

meta-análisis más grandes realizados sobre las diferencias productivas entre técnicas agrícolas, también afirma que las diferencias de productividad son mucho más reducidas de lo que durante el siglo XX se había estimado, calculado este *gap* un poco por debajo del 20%. Además, también confirman que las diferencias de productividad son contextuales.

El segundo argumento, además muy contundente, es que la agricultura biotecnológica en general, y en particular aquella basada en el uso de OMG para resistir la acción del glifosato, no produce incrementos de productividad diferenciados de los que va produciendo la agricultura convencional no biotecnológica. Abundemos un poco más sobre esta argumentación: si la agricultura basada en OMG supusiera una mejora sobre la convencional²⁶, observaríamos incrementos productivos a lo largo del tiempo más fuertes. Y esto no ocurre. Seamos claros: desde finales del siglo XIX en EE.UU. (país que más OMG utiliza) se han venido observando incrementos productivos. La tendencia es prácticamente lineal, con fuertes subidas y bajadas alrededor de la media, eso sí. La agricultura tradicional, primero, pasando por la convencional, después, han mantenido incrementos similares. Si la agricultura basada en OMG fuera sustancialmente superior, veríamos cómo con su introducción los aumentos pasarían de corresponderse con una recta lineal, a ser cada vez mayores y producir un aumento exponencial de la producción. En una gráfica donde representáramos los aumentos de producción veríamos que los aumentos pasan de tener una media X (de las tecnologías convencionales) a una media Y superior (correspondiente a la mejora biotecnológica). En 1996 la práctica totalidad de la soja cultivada en EE.UU. era soja transgénica resistente a glifosato. Sin embargo, los aumentos de producción siguen el mismo patrón histórico que el caso del trigo (Figura 1).

Con la sola visualización de los datos no basta para tan contundente afirmación. Hay que analizarlos. Vayamos con una breve explicación sobre epistemología y estadística. En muchas ocasiones vamos a encontrarnos con afirmaciones, acompañadas por gráficas, que afirman que la variable X, de nuestro interés, está inmersa en una tendencia

26 Ya hemos dicho que la agricultura convencional es un conjunto muy heterogéneo de técnicas agrícolas. Entre ellas, encontramos el uso de híbridos.

positiva (o negativa) conforme Y cambia. Algunas veces esta afirmación puede venir acompañada de un índice (R^2) o una prueba estadística (r de Pearson) sobre lo bien que ambas variables están correlacionando.

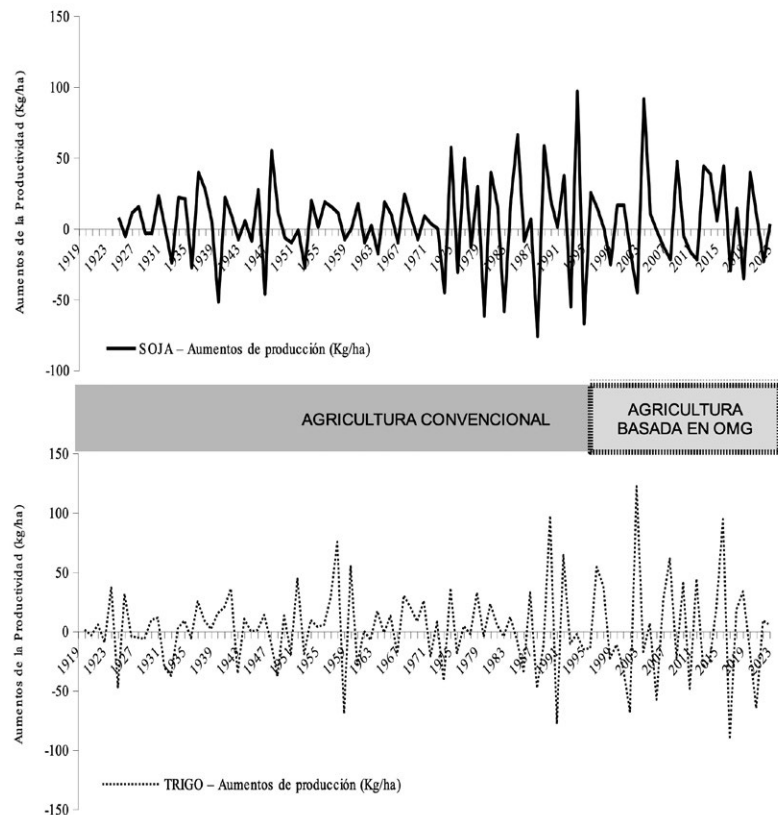


Figura 1. Aumentos de la productividad en trigo y soja en los EE.UU. Desde 1990, más del 90% de la soja cultivada en EE.UU. es soja transgénica resistente a glifosato. Por su parte, no hay variedades comerciales de importancia de trigo transgénico. Fuente: elaboración propia con los datos de la USDA

La primera advertencia que todo el mundo debe grabarse a fuego en su cabeza es que “correlación no implica causalidad”. Es decir, que observemos dos variables cambiar de forma paralela y correlativa en el

tiempo, no implica que exista una unión causal entre ambos cambios. Es cierto que puede ser una primera sospecha, pero nunca una conclusión preliminar (tampoco ni siquiera una mera conjetura)²⁷. La segunda advertencia es que la tendencia que observamos, y que nos parece tan evidente en una gráfica, puede no existir (Figura 2).

Imaginemos que existe un organismo que tiene una masa de 100 unidades (unidades arbitrarias, nos da igual si son gramos, toneladas o tomates). Imaginemos que, a lo largo del tiempo y, de forma aleatoria, su masa sube o baja. Imaginemos que este organismo nació en el año 1900 y que, cada año que pasa, gana o pierde de forma aleatoria 1 unidad de masa. Esto puede dar lugar a gráficas con “claras tendencias” al alza o la baja. Sin embargo, no hay ninguna causalidad tras esas “tendencias”. Por tanto, no podemos denominarlas tendencias. Igual que no existe una mayor probabilidad (o menor) de obtener un 6 en un dado de seis caras cuando has obtenido previamente otro 6, en este caso no existen más probabilidades de ganar una unidad de masa cuando, previamente, ya has ganado una.

Este tipo de errores lógicos lastraron mucha de la literatura científica del siglo pasado. Un ejemplo notable es el de la paleontología. David M. Raup (1977) demostró que aplicando la hipótesis nula *Random Walk*, paseo aleatorio o “paseo del borracho” a datos paleontológicos sobre tamaños, crecimientos y otras variables de organismos fósiles, se obtenían conclusiones sorprendentes: muchas de las “tendencias” eran, en realidad, indistinguibles estadísticamente de una serie generada de forma aleatoria²⁸.

- 27 Un ejemplo muy didáctico, divulgado por el creador del Pastafarismo (un movimiento religioso que hace de parodia de las religiones) Bobby Henderson, de cómo la correlación y la causalidad no están unidas lógicamente en modo alguno es observar la correlación perfecta que se observa entre el decreciente número de piratas que surcan los mares desde el año 1820 y el progresivo aumento de las temperaturas de los mares y océanos.
- 28 Por ejemplo, una de las tendencias más famosas en paleontología (y que se consideraban hechos incontrovertibles) y ejemplo de gradualismo filético (evolución parsimoniosa, constante y con dirección determinada hacia un objetivo, por ejemplo, mayor tamaño) era el constante incremento de tamaño de algunos protozoos, como los foraminíferos (muy estudiados por su importancia en la localización de yacimientos petrolíferos). Resultó que la más famosas de todas las series, la del foraminífero del pérmico *Lepidolirina multiseptata* no se distinguía estadísticamente de un *Random walk*.

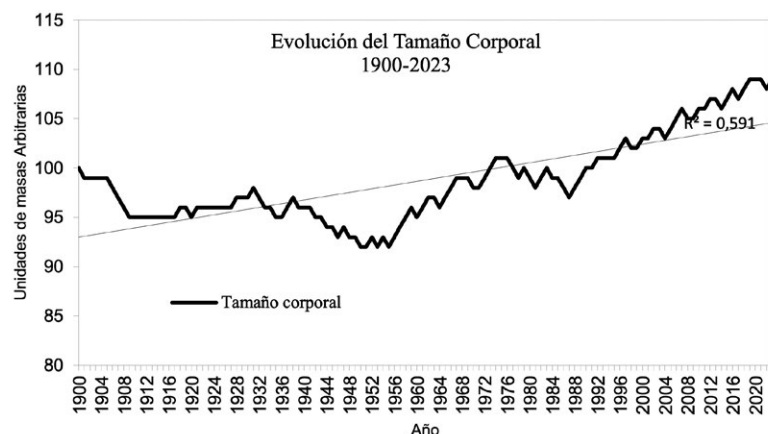


Figura 2. Serie aleatoria de números aleatorios sumados a una cantidad inicial de 100. Aparentemente se produce una tendencia al alza, pero estadísticamente se puede demostrar que, efectivamente, esta "tendencia" no supera la hipótesis del paseo aleatorio o "paseo del borracho". Fuente: elaboración propia

¿Y cómo podemos diferenciar si los incrementos en la producción agrícola están causados por una determinada técnica o simplemente no podemos asignarle la causalidad?

La estadística nos da herramientas para ello. Volvamos al a figura 1. Vemos que aparentemente no existe una variación en los incrementos de productividad entre diferentes técnicas agrícolas. Tampoco parece haber una correlación. Pero aquello que pone el clavo en el ataúd de los supuestos beneficios de las variedades de plantas resistentes a glifosato es que el valor crítico para diferenciarse estadísticamente de un paseo aleatorio está por debajo de ese valor crítico²⁹.

29 Esta es una operación estadística relativamente sencilla pero, como casi cualquier cosa en estadística, no es fácilmente trasladable a palabras. Los cálculos se centran en ver, de la serie de datos disponible, cuantos de ellos se sitúan por encima del promedio, y cuantos por debajo. En un *Random Walk*, los que se sitúan por encima y por debajo deberían ser iguales, en términos estadísticos. Bajo lo que en estadística se conoce como "nivel de confianza", se añade cierta incertidumbre a este promedio teórico del paseo aleatorio. A nadie le suelen salir exactamente 25 caras y 25 cruces con 50 lanzamientos de moneda.

Esto tiene algunas consecuencias: I) el promedio de los incrementos de producción es indiferenciables estadísticamente, ya sea utilizando técnicas de cultivo asimilables a la agricultura convencional, o utilizando plantas OMG resistentes a glifosato; II) los incrementos en la producción que se observan no son consecuencia, al menos directa, de la técnica concreta de cultivo que utilizemos.

Entonces, ¿por qué se han hecho hegemónicos los cultivos de OMG, sobre todo en tipos concretos de productos agrícolas?, ¿por qué no se ha avanzado en la aplicación comercial de esta técnica si para una parte de la literatura científica es una técnica claramente superior en productividad?

Una de las claves nos las da el caso *Bowman v. Monsanto Co.*, cuya sentencia se conoció en 2013 y estableció la primacía del derecho a la propiedad intelectual de las semillas modificadas genéticamente por la empresa Monsanto³⁰ frente al derecho sobre lo producido en los campos del Agricultor. Vernon Hugh Bowman el único delito que había cometido era guardar parte de la producción, como se ha hecho durante milenios, para volver a cultivar al año siguiente, seleccionando semillas que mantuvieran las propiedades de resistencia al glifosato y que fueran fértiles de nuevo³¹. El Tribunal Supremo de los EE.UU. llegó a la conclusión que esta conducta infringía las patentes de Monsanto: las patentes no permiten a un agricultor reproducir semillas plantando y cosechando semillas guardadas sin el permiso del titular de la patente. En otras palabras,

30 Por entonces la fusión con Bayer todavía no había ocurrido.

31 Tras esta sentencia, Monsanto se comprometió a no utilizar lo que se denomina "*Tecnología Terminator*". Esta técnica produce que la siguiente generación de semillas sea estéril en su mayor parte, y por tanto, quede violado el derecho consuetudinario de que "*la tierra es para quien la trabaja: ella, y sus productos*". El conjunto de técnicas denominadas *Terminator*, fueron desarrolladas en un inicio por el departamento de agricultura de EE.UU. y la compañía D&PL. La contrapartida de Monsanto fue obligar a toda persona que comprara semillas modificadas genéticamente a firmar un documento en el que se comprometía a no sembrar de nuevo las semillas recolectadas. Hay derechos que, aunque se firme su renuncia, siguen vigentes. El derecho a poder comer es uno de ellos. Se consiguió que Monsanto accediera a dejar de utilizar las tecnologías de restricción de uso gracias a la movilización campesina global.

los tribunales estaban garantizando el derecho de monopolio sobre un determinado producto, en este caso producido por Monsanto.

Si, efectivamente, las patentes son un monopolio. Esto es algo que nadie niega³². Monopolio y derechos exclusivos, cuando se trata de vender cosas en un mercado, tiene pocas diferencias prácticas. Mucha gente argumenta que es un monopolio necesario, pese a que toda la teoría política liberal se base en la prohibición del monopolio justamente porque impide el *laissez faire* e invalida todas las tesis sobre la libre competencia y el mercado perfecto. La contradicción reside ahí. Por contra, se puede argumentar que la existencia de una patente es, en realidad, necesaria para el crecimiento y la difusión de una idea y/o una tecnología: se recaba inversión pública y privada, se somete la técnica a ensayo y error, se perfecciona y se escala su producción. Es un debate del siglo XIX que ganó la postura en favor de las patentes a la vista del crecimiento del tiempo legal de monopolio establecido para ideas, producciones artísticas y/o tecnologías.

Así que, la razón última de la producción de OMG no es el incremento de la producción, sino la reducción de costes y, por tanto, el incremento de la tasa de reproducción del capital invertido en las empresas que producen estas semillas. El debate sobre las patentes no es un debate ideológico sobre la moralidad, o no, de que un creador disponga de un monopolio limitado en el tiempo sobre su idea, sino la defensa del capital invertido en unas empresas, frente a las pérdidas que les puede provocar que otros agricultores, dentro del mismo Estado o en otros países, puedan competir con ese capital y hacerle perder valor. Los OMG son lo que Javier Echeverría denominó tecnociencia: son una técnica, que tiene su origen en el desarrollo tecnológico a partir de conocimiento científico básico, cuya función principal es crear expectativas (en este caso aumentos de la producción incomparablemente

32 Por ejemplo, la Organización Mundial del Comercio en su *Acuerdo de la OMC sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual relacionados con el Comercio* (Acuerdo sobre los ADPIC) de 1994 define los derechos de propiedad intelectual, que incluyen los derechos de autor y la propiedad industrial, como “aquellos que se confieren a las personas sobre las creaciones de su mente. Suelen dar al creador derechos exclusivos sobre la utilización de su obra por un plazo determinado”.

mejores) para atraer inversión, apoyo político y social. La investigación en OMG no es una herramienta social cuyo objetivo sea incrementar el conocimiento. Los OMG son una herramienta económica. Echeverría puede explicarlo mucho mejor:

“Entre otros aspectos, la tecnociencia se caracteriza por la instrumentalización del conocimiento científico-tecnológico. El avance en el conocimiento deja de ser un fin en sí mismo para convertirse en un medio para otros fines”³³.

El volumen del mercado de OMG fue en 2022 de 21.080 millones de dólares estadounidenses. Se prevé que 2023 acabe con un volumen de mercado 22.290 millones de dólares y, para 2027 se estima un volumen cercano a los 30.000 millones³⁴. Esto supone que en 2022 se vendieron OMG por un valor superior al PIB de Armenia, Albania o Moldavia³⁵; que en 2023 se han vendido OMG por valor aproximado equivalente al PIB de Bosnia y Herzegovina o el Líbano, y que para 2027 se esperan unas ventas que equivaldrían al PIB de Senegal, Islandia o Georgia del año 2022.

Los cultivos de OMG utilizados son básicamente cuatro: soja, maíz, algodón y colza (en proporción 4:4:1:1 aproximadamente). El resto de cultivos modificados genéticamente son absolutamente residuales. Ninguno de estos cultivos es utilizado para alimentar a los seres humanos de forma directa³⁶. La soja resistente a glifosato es utilizada principalmente para producir carne de vacuno y otras carnes baratas, con el subsiguiente daño medioambiental que la producción de carne conlleva. La soja transgénica está fomentando una actividad industrial que, según el informe de la FAO

33 Echeverría, J. (2003). *La revolución tecnocientífica*. Madrid: Fondo de Cultura Económica de España. p.25

34 Estas estimaciones han sido realizadas por “The Business Research Company”, en su informe “Genetically Modified Crops Global Market Report 2023”. Es un informe al cual solamente se puede acceder previo pago de 4000\$ y disponemos únicamente del resumen ejecutivo. Veremos más adelante que los duros años 2010 para esta tecnología produjeron uno de los casos de lobbying empresarial en asuntos relacionados con la publicación científica más grandes de la historia reciente.

35 Datos del PIB obtenidos del Banco Mundial. Año 2022.

36 Esto sí ocurre mediante el uso de derivados en la industria alimentaria.

“La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones”, emite más de 3.000 millones de toneladas de CO₂ equivalentes al año, 2/3 de las cuales vendrían de la producción de carne de vacuno. Estas son unas emisiones que, según el informe de la Comisión Europea, *“CO₂ emissions of all world countries”* equivalen a las emisiones de CO₂ de un país como Níger³⁷, Islandia o Haití. Así contribuye la soja con la seguridad alimentaria del mundo: acelerando la crisis climática en la que vivimos inmersos. El maíz transgénico³⁸ se utiliza para elaborar numerosas materias primas de la industria de la alimentación (gomas, espesantes, aditivos de diversos tipos) a precios competitivos. El algodón transgénico nos viste, pero no nos alimenta³⁹. Y la colza transgénica no es utilizada para llenar nuestras aceiteras, sino para elaborar los energéticamente ineficientes biocombustibles (biodiésel)⁴⁰.

Hay dos asuntos más que no podemos dejar de tratar: las luchas del campesinado mundial contra este monopolio del capital agrícola de occidente y la propia “resistencia” que impone la naturaleza. La entrada

37 En Níger viven casi 20 millones de personas. La producción mundial de carne está emitiendo la misma cantidad de CO₂ mismo que 20 millones de personas.

38 El maíz transgénico que suele utilizarse es un maíz que produce la toxina del *Bacillus turgiensis*, un microorganismo que produce durante su esporulación δ -endotoxinas, unos cristales proteicos que contienen la denominada toxina *cry*, que afecta el epitelio digestivo de insectos que se alimentan de partes de la planta que contiene esta toxina *cry*. Lo que hace el maíz Bt es producir en su tejido toxina *cry*. Sin embargo, la primera planta Bt no fue el maíz o la patata (que también ha sido desarrollada como variedad transgénica y que actualmente no es prácticamente utilizada), sino el tabaco.

39 El algodón transgénico también produce la toxina del *B. turgiensis*.

40 La Tasa de Retorno Energético (TRE o EROI en inglés) es un índice que resume la cantidad de energía utilizada para extraer un determinado recurso y/o fuente de energía. El petróleo tradicional tiene una TRE de 80 o más, es decir, por cada unidad de energía invertida, se obtienen 80. Es una fuente de energía fácil de extraer y muy ricoenergética. Sin embargo, en los biocombustibles, en palabras de Townsend *et al.* (2014) *“la TRE varía desde menos de 1:1 hasta aproximadamente 10:1, mucho menos que incluso el petróleo actual. Además, el suministro potencial de estas fuentes es limitado (...). Se espera que estos recursos de menor calidad tengan mayores impactos en la vida silvestre por unidad entregada a la sociedad que los combustibles actuales, principalmente debido a la naturaleza extensiva del recurso y la posible conversión de tierras forestales a la agricultura”*.

en tromba del capital de occidente en la producción agrícola mundial es perfectamente captada Edelman *et al.* (2018) en su análisis de lo que denomina “Guerras campesinas” de finales del siglo XX:

“La historia temprana de los Movimientos Agrarios Transnacionales (MAT) que surgieron en la década de 1980 está estrechamente ligada a los programas de austeridad y programas económicos de ajuste estructural del FMI y del Banco Mundial, los acuerdos comerciales bilaterales y multilaterales, tales como el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (NAFTA por sus siglas en inglés) (1994), las negociaciones de la Ronda Uruguay del GATT que culminaron en 1995 con la formación de la Organización Mundial del Comercio (OMC) y sobre todo la reestructuración del régimen alimentario. Estas nuevas formas de gobernanza neoliberal marcaron el fin del estado de bienestar keynesiano y de manera más general el fin de los proyectos de desarrollo nacional. Las amenazas para los agricultores a pequeña escala incluían tanto la desaparición del apoyo estatal como nuevas situaciones de vulnerabilidad ante los mercados abiertos y el comercio globalizado”.

En otras palabras, la escalada de la producción del glifosato asociado a organismos modificados genéticamente para resistir su acción fue una de las puntas de lanza que utilizó el norte global para hacerse con una buena parte de la acumulación originaria⁴¹ del sur global (Sudamérica y África, fundamentalmente). ¿Cómo se concretó este hurto?, ¿qué herramientas se utilizaron desde occidente? Sigue Edelman *et al.* (2018):

“El neoliberalismo también supuso la creciente mercantilización y privatización de la biosfera, incluyendo la apropiación de bancos de germoplasma a través de patentes y derechos de obtener, lo que facilitó la generación de enormes ganancias por semillas que los campesinos habían seleccionado durante miles de años. Las leyes de certificación de semillas en casi todos los países comenzaron a imponer los cultivos

41 Concepto acuñado por Karl Marx en su obra *El Capital* y que definía como “el aniquilamiento de la propiedad privada que se funda en el trabajo propio, esto es, la expropiación del trabajador”, quitando en este caso al pequeño agricultor la fuente de subsistencia y promoviendo “la explotación del trabajo formalmente libre de otros, es decir, el trabajo asalariado”.

que el agricultor podía sembrar, reflejando y contribuyendo así a un proceso de concentración extrema y rápida entre las principales compañías de semillas".

Las leyes son expresión de la correlación de fuerzas entre las clases sociales. El proceso legislativo es una de las formas en las cuales se teatraliza la otrora violenta lucha de clases. La mayor parte de parlamentos del mundo nunca fueron realmente expresiones de la voluntad popular cuando ésta se mostraba contraria a la reproducción del capital. Además, cuando la lucha en los campos y en las calles de las ciudades se produce y las élites nacionales no pueden detenerla con los habituales dispositivos de represión y de bricolaje narrativo en los medios de comunicación (la manida táctica del palo y la zanahoria), aparecen los poderes privados para asegurar sus ganancias⁴².

Pero el capital no siempre puede hacer lo que quiere o no siempre obtiene toda la tasa de ganancia que esperaría, por mucho esfuerzo que ponga sobre la represión de la lucha social. A veces, los límites biológicos y físicos se muestran descarnados y los objetivos iniciales de una tecnología son laminados y reducidos por los efectos inesperados de la complejidad.

Nada tiene sentido en biología sino es a la luz de la evolución decía Theodosius Dobzhansky y cuando existe una presión evolutiva enorme hacia una determinada dirección, es esperable que la selección natural actúe. Cuando se aplica un tóxico pensamos que todos los organismos van a reaccionar de la misma manera ante él. Estadísticamente es cierto. La inmensa mayoría lo hará. Morirán. Por ejemplo, en el caso de aplicarse glifosato, las plantas rociadas con él desaparecerán. Sin

⁴² Veremos con un poco más de detalle las capacidades de inteligencia que desarrolló Monsanto durante las primeras dos décadas del siglo XXI en el capítulo 5 de este texto. Veremos que existió una relación entre la empresa estadounidense de mercenarios Blackwater y Monsanto y que Monsanto tenía una red de espionaje y de operadores mediáticos distribuida por revistas científicas, medios de comunicación y universidades. Una versión reducida del análisis se puede encontrar *"Mentiras y glifosato: los Monsanto papers y la ciencia para el negocio"*, publicado en El Salto Diario en 19 de julio de 2022, en el blog La Paradoja de Jevons.

embargo, una de las bases de las que parte la teoría de la evolución (base ya establecida por Charles Darwin y Alfred R. Wallace) es que las poblaciones son diversas: no habrían dos individuos iguales en tamaño, forma, metabolismo o cualquier otra propiedad que se nos pueda ocurrir.

Hay dos investigaciones que nos ponen en la pista de lo que está ocurriendo: I) Heapa y Duke realizaron en 2017 una revisión sobre la cantidad de plantas que habían adquirido la capacidad de resistir al glifosato; II) Sammons y Gaines en 2014 estudiaron qué mecanismos estaba promocionando la selección natural para producir plantas resistentes al glifosato.

En el primero de los trabajos, Hepa y Duke constatan que el mito de que los herbicidas acabarían con las plantas no deseadas en los cultivos y que estos abrían una época dorada (y de duración ilimitada) de la agricultura es totalmente falso. Se cae a trozos bajo la selección natural y se presenta como una estrategia que tuvo su lugar en el modelo productivo agrícola durante las décadas que ocupan el espacio temporal entre la revolución verde y el uso intensivo del herbicida glifosato con las variedades de OMG resistentes a este herbicida. El control de estas plantas no deseadas nunca volverá a ser "simple, barato y efectivo" y con un incremento de la tasa de ganancia del capital sustancial, sino que tendrán que aplicarse modelos complejos de manejo de las "malezas". Dicen los autores que:

"Las malezas resistentes al glifosato han resultado de esta dependencia excesiva del glifosato, y estamos al borde de fallos generalizados en el control de malezas porque nuestros programas de control no están lo suficientemente diversificados y la industria química no está introduciendo herbicidas con nuevos sitios de acción. A medida que proliferan múltiples malezas resistentes, los productores se verán obligados a implementar programas integrados de manejo de malezas más complejos para mantener el control de malezas. La medida en que sean capaces de implementar programas complejos de control de malezas determinará cuánto tiempo podrán retrasar el fracaso total de los herbicidas".

Esto solamente tiene una conclusión posible. Sino se implementan medidas de manejo complejas, con diferentes estrategias de acción (control biológico, herbicidas orgánicos, manejos del terreno que incorporen cambios en la estructura del suelo, etc.), las resistencias a los herbicidas pueden tornarse hegemónicas y acabar causando un gran colapso en la producción agrícola. Y pese a que puedan implementarse nuevas tecnologías en base a herbicidas, terminan asegurando los autores, *“las malezas evolucionarán en torno a cualquier estrategia de control de malezas que se emplee”*.

Por su parte, los mecanismos metabólicos y fisiológicos descubiertos por Sammons y Gaines son realmente espectaculares. Algunas especies, como las del género *Lolium* son capaces de secuestrar el glifosato en vacuolas intracelulares, impidiendo su acción sobre la ruta shikímica de síntesis de aminoácidos aromáticos. El amaranto (*Amaranthus palmeri*) ha sido capaz de incrementar el número de copias del gen responsable de la síntesis de la EPSE sintetasa. De esta manera incrementa su capacidad de producir este encima y, a la misma dosis de glifosato, queda sin inhibir suficiente cantidad como para que la planta sobreviva. La duplicación génica es un clásico en la evolución. Muchos rasgos fisiológicos en muchas especies han surgido así. Además, le permite a la planta entrar en combate directo con los productores de OMG. A mayor concentración aplicada, más se incrementa la presión de selección sobre aquellas cepas del amaranto con más copias del gen de la EPSE sintetasa.

Otra estrategia, muy interesante, que utilizan estas “supermalezas” es la de necrosar rápidamente sus hojas más maduras. Esa necrosis rápida genera una especie de “paraguas” a base de hojas muertas que evita la translocación del glifosato dentro de las hojas sanas. Esto ocurre en la especie *Ambrosia trifida*. Además hay otros mecanismos de resistencia aún desconocidos, basados probablemente en mutaciones específicas en la ruta de síntesis de los aminoácidos aromáticos que es diana del glifosato. Como afirman los autores de este trabajo, *“la acumulación de múltiples mecanismos [de resistencia] es muy frecuente, particularmente en especies de polinización cruzada, produciendo mayores niveles de resistencia en respuesta a la continua presión de selección del glifosato”*.

El reclutamiento en tantas especies de una gran diversidad de procesos bioquímicos para establecer resistencia al glifosato sugiere que el manejo de malezas tendrá que diversificarse y utilizar métodos adicionales para controlar las malezas resistentes al glifosato”.

¿A qué concentraciones suele encontrarse en animales y en los humanos?

Hemos visto que el glifosato está presente en el medio acuático, tanto en el agua de lluvia, ríos, aguas subterráneas, lagos y otras masas de agua (incluyendo las desembocaduras de los ríos y las aguas costeras), como en el suelo o incluso el aire. Pero antes de saber a qué concentraciones produce efectos deletéreos este herbicida, deberíamos saber si esta molécula ha sido hallada en los cuerpos de los organismos vivos, y a qué concentración se ha encontrado.

Vamos a empezar por un trabajo realizado por la propia industria del glifosato. John L. Vicini trabaja para el departamento de “Regulatory Sciences” de *Bayer Crop Science* y ha encabezado una revisión sobre los límites regulatorios alimentarios en Europa y EE.UU. al glifosato y la cantidad del herbicida detectada en la orina de las poblaciones que habitan estas dos regiones. Vicini *et al.* (2021) afirman que el 99% de las concentraciones de glifosato encontradas en los productos destinados a la alimentación humana en Europa y EE.UU. están por debajo de los estándares de seguridad marcados por la EFSA y la FDA, respectivamente. En Europa, por ejemplo, la Ingesta Diaria Aceptable (IDA, o ADI por sus siglas en inglés) está definida en 0,5 mg de glifosato/kg de peso corporal. Para los autores esto automáticamente significa que *“las conclusiones de las evaluaciones de riesgos, basadas en modelos dietéticos o datos de orina, son que la exposición al glifosato de los alimentos está muy por debajo de la cantidad que se puede ingerir diariamente durante toda la vida con una certeza razonable de que no causará daño”*.

Con una certeza razonable de que no causará daño. Sigamos. ¿Qué datos concretos tenemos de exposición al glifosato? Krüger *et al.* (2014) estudiaron explotaciones ganaderas alemanas y danesas, midiendo la

concentración del glifosato en la orina de las vacas. También estudiaron la concentración del herbicida en sus cuerpos. También estudiaron varias granjas de cría de conejos, centrándose únicamente en las concentraciones de la orina. Finalizaron el trabajo observando la concentración del glifosato en la orina de humanos habitantes de grandes ciudades alemanas y danesas. Como también afirmaban Vicini *et al.* (2021), "*Las mediciones de glifosato en orina también se pueden utilizar para estimar la exposición al glifosato ingerido*". ¿Qué encontraron los investigadores alemanes de la Universidad de Leipzig? La concentración del glifosato en la orina de las vacas osciló entre 20 µg/L y 40 µg/L en cuanto a las medias, aunque hubieron casos de concentraciones mucho más altas. Los tejidos de las vacas mostraron concentraciones que oscilaron en promedio entre 16 µg/g y 30 µg/g, destacando el hígado como principal órgano de bioacumulación. La orina de los lagomorfos osciló entre 20 µg/L y 70 µg/L. Finalmente la orina de los humanos urbanitas tenía una concentración de entre 0.5 µg/L y 2 µg/L de glifosato.

Osten & Dzul-Caamal (2017) fueron un poco más lejos en el análisis de la exposición humana a glifosato y estudiaron las concentraciones en el agua corriente y embotellada (en un país como México) en una zona agrícola intensiva en OMG donde potencialmente pudiera existir una exposición continuada (Estado de Campeche, en el municipio de Hopelchén). Las concentraciones promedio en la orina oscilaron (según localidad de muestreo dentro del municipio) entre los 0,22 µg/L y los 0,47 µg/L. La concentración de glifosato encontrada en el agua corriente y el agua comercial embotellada osciló entre 0,35 µg/L y 0,65 µg/L.

Christina Gillezeau *et al.* (2019) trabajaron sobre un tema crucial: el glifosato como un agente de riesgo laboral. Realizaron una revisión de 19 estudios anteriores que analizaron diversos fluidos corporales de trabajadoras y trabajadores expuestos al glifosato debido a su trabajo y encontraron concentraciones que bailaron en un rango amplio de 0,26-73,5 µg/L. También revisaron (dentro de este conjunto de 19 trabajos) las concentraciones encontradas en la población general, hallando concentraciones algo menores que oscilaron entre los 0,16 µg/L y los 7,6 µg/L. Los promedios de casi todos los estudios estuvieron en la parte más baja del rango, entre 0,2 µg/L y los 2,5 µg/L,

indicando que la mayor parte de concentraciones detectadas en los fluidos corporales era baja. Es conveniente destacar uno de los trabajos citados por Gillezeau y sus colegas. McGuire *et al.* (2016) estudiaron la concentración de glifosato en la leche materna y orina de 41 madres lactantes. En ninguna muestra de leche se encontró concentraciones detectables de glifosato o AMPA (utilizaron análisis menos sensibles que para la orina con un límite de detección de 1 µg/L)⁴³. Por contra, el 92,5% de las muestras de orina dieron positivo a AMPA y Glifosato (con promedios de 0,28 µg/L y 0,3 µg/L respectivamente).

Veremos que estas concentraciones, pese a ser bajas en términos generales, tienen un efecto potencial en la salud de los humanos, en el desarrollo embrionario de los vertebrados, en su salud y su supervivencia diferencial y, por tanto, en las dinámicas poblacionales. Y veremos cómo las concentraciones ambientales ya también citadas tienen una profunda influencia en los ecosistemas de nuestro planeta.

Situación legal del glifosato en el mundo

La información disponible sobre cualquier tipo de régimen regulatorio legal va a condicionar este análisis que, por fuerza, será incompleto. Cualquier persona que trabaje, o halla trabajado, para una empresa de importación y exportación de mercancías, sabrá que para una empresa europea la información sobre los límites legales de los pesticidas (o cualquier otras sustancia sujeta a control legal por las autoridades sanitarias) son fácilmente accesibles pero, que fuera de la UE, la cosa se complica. EE.UU., China, Rusia o Arabia Saudí son ejemplos de países bastante parcos en cuanto a su sistema regulatorio interno. Hay toda una red de blogs escritos por personas particulares

⁴³ Veremos más adelante, cuando tratemos los efectos del glifosato en humanos, cómo sí que hay algunos estudios que han encontrado concentraciones relevantes de glifosato en la leche materna. En este apartado simplemente estamos haciendo un dibujo preliminar del orden de magnitud de las concentraciones que pueden ser biológicamente relevantes para el conjunto de los organismos de la biosfera y, en particular aquí, para el ser humano.

que pueden sacarte de un apuro técnico en un determinado momento, pero por regla general es difícil buscar la información necesaria.

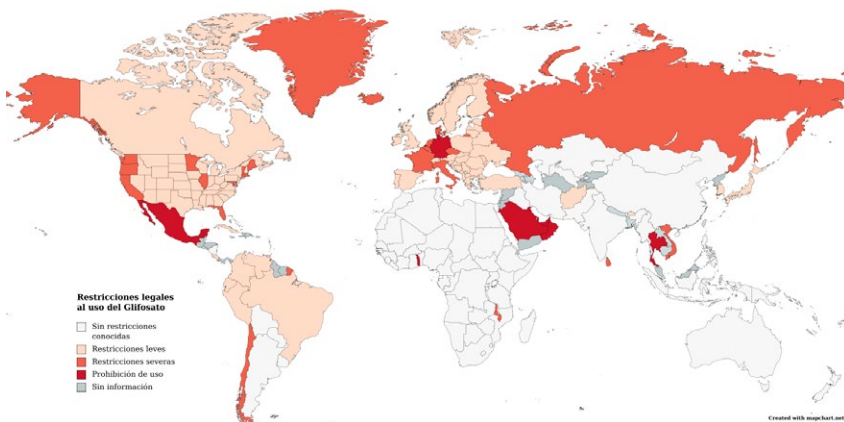


Figura 3: Mapa global de las restricciones legales al uso de preparados en base a glifosato. Las fuentes del mapa son muy diversas: Agencias de prensa (AFP), Agencias estatales (EPA, PRMA, etc.), asesorías privadas (Kcomber Inc.) y artículos en revistas revisadas por pares. Hemos decidido incluir los Estados de EE.UU. por la diversidad legislativa que presentan y por la importancia económica de algunos de ellos que sí presentan restricciones severas (como California). Elaborado con mapchart.net.

Con el glifosato, y el estado legal en los diferentes Estados de las Naciones Unidas, ocurre algo similar. Sin embargo, la relevancia pública de este herbicida (debido a su masivo uso, tanto en agricultura como en jardinería) hace que cierta información sea accesible y contrastable. También hay que hacer una importante puntualización. Cualquier fotografía de la situación es extremadamente variable. Luxemburgo y Austria intentaron, a lo largo de 2020 y 2021 prohibir el uso del glifosato en sus territorios. Defectos “de forma” en el trámite parlamentario y en la legislación dieron la oportunidad a Bayer-Monsanto de tumbar esta prohibición. En Brasil, durante un breve periodo de tiempo previo al ascenso al poder del presidente neofascista Jair Bolsonaro, funcionó a nivel federal unas restricciones muy severas al uso del glifosato en

agricultura que, en la práctica, suponía su prohibición. Estas restricciones fueron eliminadas de inmediato en 2018. Muchos ayuntamientos españoles decidieron, después de 2015 prohibir, o limitar mucho, el uso de este herbicida en zonas públicas. Esta prohibición ha retrocedido en los casos en los que la derecha y la extrema derecha han tomado el poder del municipio. Así, la regulación sobre el glifosato es muy volátil y parece cambiar mucho en función de quien ostente las competencias regulatorias.

Pese a este hándicap, se ha podido reconstruir un mapa global de restricciones legales al uso del glifosato (Figura 3). Se ha categorizado los diferentes niveles de restricción al uso del glifosato (que obviamente conforman un *continuum*) en 4 grandes categorías: I) sin restricciones conocidas: aquí se engloban países que poseen pocas o ninguna regulación acerca del uso del glifosato, utilizándose este de forma masiva para la agricultura, o bien son países que no han implementado regulaciones conocidas (o no demasiado publicitadas) y que, en todo caso, el uso dentro del país es escaso; II) con restricciones leves: el país o el Estado ha desarrollado legislación al respecto pero, o bien es laxa, o bien los límites regulatorios permiten, en la práctica, un uso amplio del glifosato. Aquí también se incluyen los países que utilizan la llamada autoregulación o regulación privada del mercado⁴⁴; III) con restricciones severas: aquí se engloban países con restricciones a la importación del Roundup, al uso de preparados en base a glifosato para particulares, al uso de estos preparados en zonas públicas, etc; IV) prohibición de uso. Así, sabemos con bastante certeza el nombre de los países que han prohibido totalmente la producción e importación de herbicidas

44 Los sistemas regulatorios basados en la autoregulación, se basan en agencias estatales que establecen unos límites para un determinado valor, o unos estándares a cumplir, pero son las propias empresas que operan en el mercado las que se encargan de hacer un seguimiento, inspección, auditoría y examen de las diferentes etapas establecidas en la regulación. Es obvio que este sistema se ha demostrado enormemente vulnerable. Los sistemas basados en agencias de control públicas que realizan inspecciones son, por regla general, más garantistas.

con base de glifosato: los países del CCEAG⁴⁵, Alemania⁴⁶ o México⁴⁷. Togo, en África, y Thailandia, en el sudeste asiático respectivamente, han prohibido la importación de productos en base a glifosato y las restricciones internas de uso son muy severas. Se han considerado estas severísimas restricciones como una prohibición de facto.

En 2023 la Unión Europea decidió no prohibir el uso del glifosato como herbicida. Le ha dado 10 años más de licencia para su uso en jardinería y agricultura. Tendremos glifosato en la UE hasta finales de 2033. Centrarse en el conflicto por la prohibición, o no, del herbicida en la UE nos puede permitir identificar qué componentes, a parte de los ideológicos, pueden estar funcionando para dibujar el mapa global de su uso⁴⁸.

Ya hemos dicho que el liberalismo político (y la versión iliberal o autoritaria) estaría en principio en favor de desregular el uso del glifosato. Estas élites políticas no hacen más que representar, formal o informalmente, los intereses del capital en los diferentes Estados. Bolsonaro volvió a permitir el uso casi indiscriminado del glifosato porque era esencial para uno de los principales sectores que financió y apoyó su candidatura: la agroindustria. Hay que matizar, no obstante, que la nueva derecha está formada, en algunos casos, por neofascismos populistas y estos no tienen reparo en oponerse al uso del herbicida si esto

45 Consejo de Cooperación para los Estados Árabes del Golfo. Ésta es una organización interarabica basada en una unión aduanera, la cooperación militar y el petróleo (y gas natural) como fuente de riqueza común. Está formada por 6 Estados: Arabia Saudí, Emiratos Árabes Unidos, Catar, Baréin, Omán y Kuwait.

46 Prohibición completa prevista para finales de 2023. Sin embargo, a principios de 2024 el Cuarto Tribunal Colegiado en Materia Administrativa Mexicano ha paralizado la aplicación total del decreto presidencial que prohíbe la importación del herbicida.

47 Prohibición completa prevista para 2024. Monsanto-Bayer presentó más de 30 demandas en 2020 para impedir esta prohibición e intentar declararla inconstitucional. En junio de 2024, decidió retirarlas en lo que el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) definió como “*un triunfo por la vida, la salud y la soberanía alimentaria*”.

48 Desarrollaremos brevemente el panorama del lobbying y las puertas giratorias entre empresas y organismos regulatorios europeos en este apartado, pero se proporcionará un análisis en profundidad en el capítulo 5.

va a significar un mayor apoyo popular sin perjuicio a sus benefactores. El intento de Austria de prohibirlo se enmarca en esta casuística⁴⁹. La dicotomía derecha antiecológica e izquierda ecologista ya no funciona como análisis.

¿Cómo consiguen las grandes multinacionales como Bayer-Monsanto que organismos como la Comisión Europea, la EFSA o las Comisiones políticas que tienen que decidir sobre la extensión del permiso de uso en la UE o incluso tribunales (como en los casos de Austria y México) alcancen decisiones que les beneficien?

Eva Novotny escribió en 2022 un artículo para la revista *Toxics* titulado “*Glyphosate, Roundup and the Failures of Regulatory Assessment*” y en el cual se detallan las puertas giratorias⁵⁰ existentes entre la EFSA y la propia industria agroalimentaria. De hecho, narra Novotny, el Parlamento Europeo a insistido a lo largo de los años para que la EFSA reforme sus prácticas laborales. Un informe⁵¹ de 2012 del *Corporate Europe Observatory* describía perfectamente estas prácticas de “puerta giratoria”, exponiendo algunos “casos modelo” donde se evidenciaban estas prácticas. Uno de los más llamativos es el del bisfenol A (BPA). En el año 2023, por fin, la EFSA reconoció que no había concentración segura de este demostrado disruptor endocrino. Sin embargo, en 2011 su opinión fue completamente distinta, estableciendo la barrera del riesgo en una Dosis Diaria Ingerida de 50 µg/Kg/día. Estudios contemporáneos en ratones establecían esa dosis en una cantidad 2000 veces menor⁵².

49 El partido en el gobierno en 2020, FPÖ, en su afán por seguir manteniendo los buenos resultados electorales, y percibiendo que la mayor parte de la población en Austria tiene sensibilidades ecologistas, propuso esta prohibición que acabó muriendo en los tribunales.

50 En un artículo de Rosa M. Sánchez y Núria Marrón publicado el 13 de enero de 2013 en *El Periódico* se presenta la expresión “puerta giratoria”, o en su original en inglés *Revolving door*, como una metáfora del paso de muchos políticos al sector privado, y viceversa.

51 Holland *et al.* (2012) Conflicts on the menu. A decade of industry influence at the European Food Safety Agency.

52 Por ejemplo, el realizado por Monica Muñoz De Toro *et al.* (2005) de la Facultad de Bioquímica y ciencias biológicas de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina).

La decisión de la EFSA recayó, en concreto, en el panel *Food Contact Materials* (CEF). Este grupo de expertos que tomó la decisión sobre el BPA estaba compuesto, al menos, por 4 miembros que participaban de las actividades del *International Life Science Institute* (ILSI). El ILSI está inscrita en el registro europeo de *Lobbies* desde el año 2021, pese a que su fundación data del año 1978.

Novotny sigue recogiendo los hechos. La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA, por sus siglas en inglés) tenía encargada la evaluación del glifosato y debía publicarla en 2017. Al menos el presidente de la ECHA, y dos miembros del comité de evaluación de riesgos, tenían conflictos de intereses que violaban las propias reglas de la ECHA.

Hay otro mecanismo, además de las puertas giratorias, que estaría influyendo en la toma de decisiones de las agencias y en las comisiones políticas. Tanto las agencias, como el resto de instituciones europeas que tomen decisiones sobre cualquier producto, deben basarse en estudios realizados en Laboratorios con Buenas Prácticas (BPL) y en estudios pagados por las empresas que produzcan la sustancia en cuestión. En otras palabras: solamente un reducido número de laboratorios en la UE tiene este sello y, normalmente (por el elevado coste que implica mantenerlos), son estatales. ¿Y cual es la consecuencia de esta normativa interna de la UE? Que la mayor parte de estudios independientes, realizados por Universidades, fundaciones o movimientos sociales, son rechazados de plano, sin entrar a considerar su buena o mala praxis científica. De hecho, la mayoría de estos trabajos acaban en revistas revisadas por pares, mientras que los estudios patrocinados por las empresas nunca son publicados. El dinero por encima de la deontología del método científico. El Estado y el *lobbying* por encima del conocimiento.

A modo de breve conclusión. Una nueva tecnología (la de los OMG resistentes a glifosato) nacida en la década de 1990, que permite la consecución y el mantenimiento de un monopolio, pero que no ayuda a la consecución de su supuesto objetivo (propagandístico) —a saber, la de incrementar todavía más la producción de alimentos y salvarnos de una supuesta “crisis demográfica” —, se vuelve hegemónica y llena

los ecosistemas del mundo entero del herbicida en el cual se basa. Como resultado, aparecen consecuencias toxicológicas en toda la biota terrestre, incluidos los seres humanos. Sin embargo, una enorme entramado de presión política, que incluye medios de comunicación, “puertas giratorias”, políticos profesionales, *lobbying* e incluso empresas de seguridad privadas, intentan año tras año seguir manteniendo el *statu quo* frente a unos movimientos sociales que ejercen de notarios de lo que ocurre y buscan, con los hechos en la mano, la prohibición de esta molécula.

Ahora vamos a pasar a detallar los efectos sobre la biodiversidad y los efectos sobre los humanos del herbicida más utilizado en el mundo y descubriremos que no existe prácticamente ser vivo en el planeta no se vea afectado, de una u otra forma, por el sistema agroindustrial promovido por el neoliberalismo y el capitalismo global.

El ecosistema edáfico

Introducción al ecosistema edáfico y su importancia en la agricultura

Rojizo, amarillento, ocre, pardo, negruzco, grisáceo. Los hay de tantos colores como formas existen de componerlo y hacerlo madurar. El suelo es quizá la parte más visible de los ecosistemas terrestres pero, quizá, también sea la parte más desconocida. Su composición interna, definida como el tamaño de partículas que lo componen, es una de las primeras aproximaciones que podemos hacer para comprenderlo. Si abundan las gravas y las gravillas⁵³, el suelo no retendrá agua y filtrará a través de los grandes poros que se abren entre sus partículas hasta encontrarse con una capa lo suficientemente impermeable como para detenerla. Si, por el contrario, abundan las arcillas⁵⁴, la presión hidrostática es tan alta que, a todos los efectos, ese suelo se comporta como una capa impermeable: se encharca en su superficie y no absorbe el agua. Además, entre los poros, también encontramos aire que circula a través de ellos e interactúa con el agua y con los minerales que allí se encuentran. Por tanto, se podría definir suelo como aquella *interfase* que se origina a partir de la interacción entre la roca fundamental (pedolito) o fase mineral, la materia orgánica (o matriz del suelo) y una fase aérea y/o líquida que ocupa la porción porosa del mismo (la solución del suelo). Sobre esta interfase se construyen los ecosistemas terrestres. ¿Cómo es la vida que albergan los suelos del planeta?, ¿es diversa,

53 Las gravas y las gravillas son las partículas del suelo superiores a 2mm de diámetro. Cuando estas alcanzan un tamaño macroscópico importante se habla de cantos rodado, primero y bloques, después.

54 La arcillas son las partículas del suelo menores a 0,0039 mm de diámetro. Que un suelo contenga arcillas es esencial para su fertilidad dado el papel catalizador de reacciones químicas y en su poder amortiguador de la contaminación, pero un exceso produce impermeabilidad.

abundante, rica y altamente interconectada o por el contrario es pobre, homogénea y no establece numerosos nexos entre sí? Miremos primero el componente más pequeño de lo vivo en los suelos. Se ha estimado que, en un suelo forestal bien conservado pueden encontrarse aproximadamente 6000 especies de bacterias⁵⁵ en un solo gramo de esta fértil interfase. Sin embargo, esto contrasta fuertemente con la diversidad de estos microorganismos que puede ser observada en un suelo cultivado: 35 especies de bacterias por gramo para un bosque de gestión maderera y de 140 a 350 especies por gramo para un suelo cultivable tradicional.⁵⁶

Pero no solo encontramos una gran diversidad de bacterias en los suelos maduros y preservados, sino que la cantidad también es importante: del orden de 1000 millones de células bacterianas por gramo de tierra. Además, encontramos otros microorganismos en el suelo. Bardgett y Van der Putten en un trabajo publicado en *Nature* en 2014, y titulado *Belowground biodiversity and ecosystem functioning*, lograron catalogar el número de especies de otros microorganismos presentes en el suelo. Cifran en 200-230 las especies de hongos (incluyendo aquí las especies de hongos que realizan simbiosis) y entre 150 y 1200 especies de protistas por gramo de suelo bien preservado.

Aunque podamos aceptar como verosímil la presencia de miles de millones de células microscópicas por cada gramo de tierra a nuestros cerebros les cuesta comprender e imaginar cantidades infinitamente pequeñas y/o infinitamente grandes. Pues bien, uno de los datos más sorprendentes sobre el suelo es que está habitado por gran cantidad de

55 El concepto de especie a nivel bacteriano merece una discusión a parte. Hay autores que consideran legítimo nombrar las bacterias como especies mientras que otros opinan que no tiene sentido ya que son capaces de intercambiar fragmentos de ADN con el resto de bacterias, creándose una especie de red genética que impediría emplear el concepto biológico de especie con cierta seguridad. Lo cierto es que parece que, pese a estos mecanismos, y a que la separación específica quizá no sea tan abrupta como podemos imaginarla en el mundo animal, si existen grupos genéticos lo suficientemente diferenciados como para diferenciarlos.

56 Hay muchos y buenos trabajos que analizan la biodiversidad bacteriana en el suelo, por ejemplo Torsvik *et al.* (2002) y O'Brien *et al.* (2016).

organismos macroscópicos. En 2016 un numeroso equipo de investigadores encabezados por Michel Rutgers, del *National Institute for Public Health and the Environment* (RIVM) de Países Bajos, estudiaron la abundancia de lombrices en los suelos europeos. Las lombrices son la clase obrera de los suelos. Son capaces de alcanzar la increíble abundancia de 1 tonelada por hectárea de terreno, promediando abundancias de entre 200-500 lombrices por metro cuadrado. Además de lombrices, encontramos otros dos grandes grupos de animales que destacan sobre el resto en cuanto a diversidad y biomasa. Por ejemplo, la mayor parte de muestras de suelo contienen entre 10 y 100 especies géneros distintos de nemátodos⁵⁷, y hasta 2500 especie de artrópodos por cada metro cuadrado de suelo.

El suelo. Ese conjunto de material inorgánico (con diferentes texturas y tamaños), materia viva, de agua y de diferentes gases que cubre la mayor parte de nuestros continentes y que es tan desconocido. Lo podríamos casi describir como una placenta que proporciona buena parte de los nutrientes esenciales para la vida y que permite que ésta se sujete, se ancle y se desarrolle. Sin el suelo, los continentes no serían más que llanuras, montañas y acantilados desnudos. Pelados. Pero, a su vez, sin la vida, sin el transporte hacia aquí y hacia allá de materia orgánica (hecho por los seres vivos y por elementos abióticos del ecosistema, como por ejemplo, el viento o el agua), el suelo tampoco existiría.

Hay una primera forma de intentar asir la complejidad de la vida en el suelo. Si clasificamos a todos los organismos por tamaños, conseguiremos dos ventajas analíticas. La primera es una visión simple, pero ordenada, de aquello que no vemos dentro del suelo. La segunda

57 Los nemátodos son un filo animal caracterizado por tener forma de gusano cilíndrico, un tegumento exterior que los protege de la depredación, y de una relativa sencillez organizativa. Una pequeña proporción de ellos son de interés en la salud y en veterinaria porque su modo de vida es el parasitismo (¿quien no ha escuchado hablar alguna vez del *Anisakis*?). Otros son de interés en la agricultura porque atacan a las plantas. Veremos que si una determinada sustancia, como el glifosato, perturba la composición de grupos funcionales de nemátodos en el suelo ello puede provocar que los nemátodos fitófagos se reproduzcan más fácilmente y se desate una plaga, afectando al cultivo. Más adelante en el texto hablamos más *in extenso*.

es acceder a una primera dimensión de la función que cumplen estos organismos dentro del suelo. Veámoslo. Domínguez *et al.* (2009) distinguen entre microorganismos (además de una enorme, y poco conocida, cantidad de virus con funciones ecológicas que solo hemos empezado a comprender⁵⁸), hongos (parásitos, simbioses y de vida libre⁵⁹), microfauna, (de ancho corporal inferior a 0,2 mm, en su mayoría ácaros y nemátodos), mesofauna (de ancho corporal entre 0,2 y 10 mm, muy diversa taxonómicamente) y macrofauna (formada en su mayoría por las lombrices de tierra, algunos moluscos, cien pies y afines, arácnidos, insectos y otros artrópodos⁶⁰).

Cuando una hoja cae al suelo o cuando un organismo perece sobre el ecosistema suelo, de forma prácticamente inmediata, comienza el reciclaje de la materia que lo compone. Esto es esencial: la mayor parte de los organismos edáficos juega algún tipo de papel (directa o indirectamente) en el reciclaje de la materia o en la circulación de energía dentro de los ecosistemas. Y no todos ellos lo pueden hacer de la misma forma. Una bacteria difícilmente puede degradar eficientemente un cuerpo entero o una gran cantidad de materia orgánica que este en grandes trozos. Así que, ¿qué secuencia ideal podemos imaginar para esa degradación de materia orgánica en el suelo? O, dicho de otra forma, ¿cómo ocurre en términos generales la circulación de la materia y la energía en los suelos?

58 Los virus parece que juegan un papel esencial en la regulación de poblaciones y en los ciclos de los elementos. Por dar solo un dato: se estima que el 5-25% del carbono fijado por los productores primarios proviene directamente de la lisis bacteriana inducida por la infección de virus en los suelos (cf. Kimura, 2008).

59 Su separación del resto de microorganismos tiene dos explicaciones. La primera es funcional: la tasa de reproducción es diferente y la velocidad con la que procesan la materia orgánica es distinta. La segunda es debido al importante rol que juegan en las simbiosis, obligadas o facultativas, con diferentes organismos fotosintéticos a través de la asociación denominada micorriza.

60 Esta clasificación tiene bastantes problemas a la hora de realizar análisis cuantitativos sobre cuanta materia circula por el sistema y por qué “contenedor” lo hace, o si queremos estudiar seriamente la biodiversidad edáfica, pero resulta inmensamente más pedagógica que cualquier otra y nos permite ver los posibles efectos nocivos de cualquier sustancia que penetra en el suelo a través de espejos

En primer lugar, la materia orgánica fresca es atacada por los microorganismos, hongos y microfauna, que la hacen accesible, en forma de “materia orgánica de transición”, a la mesofauna. La macrofauna, como las lombrices de tierra es capaz de acelerar este ciclo. ¿Cómo lo hacen? Hay tres mecanismos básicos: I) las lombrices contribuyen a mineralizar el nitrógeno orgánico o, en otras palabras, son capaces de descomponer esas moléculas orgánicas nitrogenadas provenientes de los organismos (aminoácidos, urea, ácido úrico, etc.) en nitrógeno asimilable por los organismos autótrofos; II) reducen drásticamente el contenido en carbono del sustrato y III) reducen la biomasa y el crecimiento microbianos. En definitiva, gracias a la acción de las bacterias y las lombrices, los elementos químicos quedan disponibles de forma rápida para reiniciar el ciclo dentro de la vida. No olvidamos aquí el papel de los hongos como principales descomponedores de la materia orgánica pero, según estos autores, su papel sería importante en el medio plazo.

S. Franz Bender, del grupo del Instituto *Agoscope* para una ciencia sostenible (Zurich, Suiza), y dos colaboradores más, realizaron en 2016 una revisión exhaustiva de estas relaciones tróficas edáficas y llegaron a la conclusión de que los hongos y los microdepredadores tendrían un papel preponderante en el reciclaje de la materia, teniendo un rol central los hongos mutualistas:

“El papel de los organismos del suelo en el funcionamiento del ecosistema ha sido reconocido desde hace mucho tiempo y es bien sabido que la biota del suelo tiene una importancia fundamental para el ciclo de nutrientes y del carbono en los ecosistemas naturales. La fauna del suelo y los hongos saprotróficos fragmentan y descomponen la materia orgánica, haciendo que los nutrientes orgánicos estén disponibles para su posterior procesamiento a través de toda la red trófica [...]. Los microdepredadores, como los nemátodos o los protozoos, permiten una mejor disponibilidad de nutrientes para los vegetales [...]. Las plantas, asistidas por organismos mutualistas, usan los nutrientes mineralizados para acumular materia orgánica, que eventualmente vuelve a entrar en el suelo para descomponerse nuevamente”.

Hay algunos conceptos que desarrollan Bender y sus colegas que son muy interesantes: I) intensificación ecológica y II) multifuncionalidad ecosistémica. La Intensificación ecológica es una técnica agrícola que busca comprender las funciones que realizan los organismos edáficos dentro del suelo, las interacciones que tienen entre ellos, qué necesitan y qué producen y cómo todas estas interacciones pueden afectar a los organismos que viven del suelo, entre ellos, a las plantas de cultivo. Así, dado que los suelos agrícolas suelen ser mucho menos diversos, es muy probable (y de hecho ocurre), que alguna o muchas funciones (degradación de materia orgánica, mineralización de nitrógeno, fijación de nitrógeno, etc.), estén ausentes o muy mermadas. La intensificación ecológica buscaría reducir los insumos artificiales en los campos, potenciando estas “funciones biológicas” ausentes.

De esta forma, conocer la multifuncionalidad ecosistémica, o la cantidad de funciones ecológicas que se realizan simultáneamente en un suelo (o en cualquier ecosistema), nos aportaría una idea de lo necesaria, o no, de la intervención humana en el mismo. Pero no nos aporta toda la información. Bender y sus colaboradores observan que, a altos niveles de biodiversidad, los suelos pueden presentar limitaciones en las funciones ecológicas que realizan o que, dicho de otra manera, no siempre a una mayor diversidad se produce un incremento de las funciones ecológicas. Para ellos esto significaría que podrían ser mejorables artificialmente. ¿Por qué ocurre esto? Una explicación es que existe redundancia funcional. Es decir, la diferencia, por ejemplo, entre que exista o no exista una bacteria fijadora del nitrógeno en un suelo es enorme. Si no existe, o su biomasa es muy baja, la productividad de esa tierra también será muy baja (el razonamiento es tan válido para una tierra cultivada, como para el suelo de cualquier ecosistema). Pero, la diferencia entre que existan 5 o 10 especies fijadoras del nitrógeno ya no es tan alta. Algunas de ellas establecerá simbiosis más eficientes con según que planta, otras quizá emitan sustancias al suelo que impidan el crecimiento de otras especies fijadoras del nitrógeno, etc. Ahí reside la importancia de la multifuncionalidad y la menor importancia relativa de la biodiversidad. Podríamos pensar en la biodiversidad en algo cuantitativo y en la multifuncionalidad ecosistémica como algo

cualitativo. Que exista una función ecológica más en el suelo supone un salto de productividad y de estabilidad de ese ecosistema.

Así, Bender y colaboradores hablan de “*caja de herramientas básica*”: sería un conjunto de “*funciones necesarias para el funcionamiento adecuado de los procesos ecosistémicos*”. Es más, la pérdida de funciones o “grupos funcionales” completos en sistemas poco diversos como los suelos degradados o suelos agrícolas puede ser catastrófica.

Griffiths, del Instituto escocés para la investigación de las semillas junto con un equipo de once personas más, demostraron ya hace más de 20 años que las capacidades funcionales de suelos menos diversos eran mucho más sensibles a situaciones de estrés (como lo es la aplicación de plaguicidas) que los suelos más diversos⁶¹. El trabajo de Bender *et al.* (2016) resumió este efecto en la siguiente relación causal: “*la simplificación de las redes alimentarias del suelo y la pérdida de una biota particular del suelo pueden afectar directa e indirectamente el funcionamiento de la biota restante del suelo*”.

En resumidas cuentas, el suelo tomado como sistema, recicla la materia orgánica que cae sobre él y atrae elementos (como el nitrógeno) haciéndolos de nuevo disponibles para la parte biológica del suelo que vive directa e indirectamente de él y, por tanto, al final el suelo actúa como esa placenta metafórica: es el sustento (el sustrato) del resto de ecosistemas terrestres. Y Las condiciones de estrés afectan a los componentes de este sistema y hacen caer la productividad.

Hablemos ahora de cómo el herbicida más utilizado del planeta actúa como estresante y desestabilizador del “ecosistema suelo”: el glifosato. ¿Qué les ocurre a los hongos mutualistas, a las bacterias y a la edafofauna cuando el suelo es tratado con el herbicida de Bayer-Monsanto para asegurar una producción agrícola libre de competición herbácea?

61 Griffiths *et al.* (2000) midieron la biodiversidad microbiana utilizando la presencia de diferentes bandeados de ADN en una electroforesis para estima la presencia de diferentes genomas en el suelo. No se puede hablar de que esto equivalga a “especies bacterianas” –concepto que está, por otro lado, en entre dicho–, pero si se puede servir para estimar diversidad.

Microorganismos bacterianos y glifosato

¿Qué influencia puede tener este herbicida sobre las bacterias?
¿Puede el glifosato influir sobre las bacterias que viven en los tractos digestivos de artrópodos, vertebrados y demás animales?

En un trabajo de revisión algo incompleto⁶², Duke *et al.* (2012) analizan la relación entre las enfermedades de diversos cultivos, la diversidad bacteriana, la disponibilidad de diversos elementos en el suelo y la aplicación de glifosato. Según este trabajo, el glifosato puede afectar a la disponibilidad de minerales, tanto a las plantas del propio cultivo resistente a glifosato, como aquellas plantas no diana. Hay que tener en cuenta que esto va a depender mucho del tipo de suelo y de la cantidad de glifosato aplicada⁶³. La revisión recoge, además múltiples trabajos donde la diversidad bacteriana y fúngica no es afectada y otros (los menos) donde sí se ha visto afectada.

Molli M. Newman ha encabezado dos trabajos publicados en 2016 en el que profundiza sobre la alteración de la comunidad bacteriana

62 La mayor parte de la revisión de Duke *et al.* (2012) está basada en artículos que no encuentran diferencias en las comunidades bacterianas, fúngicas y de otros organismos edáficos tras la aplicación de glifosato. Sin embargo, como veremos hay bibliografía coetánea que ya reconoce estos efectos (efectos importantes). Sin embargo, hasta en una revisión encabezada por personal del USDA, tiene que reconocerse que *“está claro que el glifosato aumenta la gravedad de la enfermedad en las plantas resistentes a glifosato”*. La prueba palpable de que la revisión es incompleta es esta cita: *“los informes sobre efectos adversos significativos del glifosato sobre la nutrición mineral y las enfermedades de los cultivos resistentes al glifosato son desconcertantes”*. Son desconcertantes si solamente atendemos a parte del cuerpo de la literatura científica.

63 El glifosato es un quelante débil. En bajas cantidades no puede secuestrar los metales. Sin embargo, hay que tener en cuenta la causalidad no lineal. Duke *et al.* (2012) reconocen que los efectos sobre la disponibilidad de metales necesarios para la síntesis de la Nitrogenasa por parte de las bacterias fijadoras de nitrógeno que viven, en muchos casos, en simbiosis con las leguminosas (y la soja es una de ellas) no están del todo claros y que puede ser una de las vías que expliquen algunos problemas de productividad observados en los campos de soja resistente al glifosato.

de la rizosfera⁶⁴ debida a la exposición a glifosato. En ambos trabajos muestra cómo la comunidad bacteriana cambia sensiblemente a largo plazo en los campos tratados con glifosato. Además, utilizaron Power-MAX^{®65} para observar en detalle cambios sobre el metabolismo de las bacterias. Para ello, estudiaron el total de los ARN producidos por los ribosomas de todas las bacterias de la rizosfera⁶⁶. Si somos capaces de etiquetar estos ARN a la función de su proteína, seremos capaces de identificar que funciones ecosistémicas realizadas por las bacterias están viéndose afectadas, o no, por el uso de este preparado comercial de glifosato. En Newman *et al.* (2016b) podemos leer literalmente que:

“Las transcripciones⁶⁷ reguladas a la baja después del tratamiento con glifosato implicaron al metabolismo de carbohidratos y aminoácidos, mientras que las transcripciones reguladas al alza implicaron al metabolismo de las proteínas y a la respiración. Además, las transcripciones bacterianas que involucran nutrientes, incluidos hierro, nitrógeno, fósforo y potasio, también se vieron afectadas por la aplicación de glifosato a largo plazo. En general, la mayoría de los biomarcadores relacionados con los fosfolípidos⁶⁸ bacterianos y fúngicos disminuyeron después del tratamiento con glifosato en comparación con el tratamiento con glifosato”.

64 La rizosfera es esa área próxima a los pelos radiculares y a las raíces de las plantas. Es donde se concentran buena parte de las interacciones ecológicas entre los diferentes organismos.

65 Una de las múltiples formulaciones comerciales en base a glifosato.

66 El conjunto de los ARN de un organismo o, en este caso, de una comunidad de organismos, se denomina transcriptoma. Los ARN provienen de la transcripción de los genes presentes en el ADN. Su análisis nos puede dar una idea de la variación en la expresión génica a un nivel global de análisis, en ese caso a nivel comunitario.

67 Se refiere aquí a cada uno de los ARNs detectados.

68 ¿Por qué es relevante que los marcadores de fosfolípidos bajen? Los fosfolípidos son las moléculas de las membranas celulares por excelencia. Su naturaleza anfipática, es decir, que posee una región con afinidad por el agua y una región con afinidad por los lípidos, les permite formar bicapas de estos compuestos que se cierran sobre sí mismas creando esa membrana plasmática. Además, las simbiosis mutualísticas entre plantas y hongos (endomicorizas) se basan bastante en el intercambio de fosfolípidos de la planta al hongo. Que estos indicadores caigan indican, en términos generales, que el número de células del suelo cae y/o que las interacciones planta-hongo también lo hacen.

Queda bastante claro que, conforme más sabemos, más somos capaces de detectar el nivel de profundidad que alcanzan las distorsiones ecosistémicas producidas por el glifosato. Para intentar ser más ilustrativos, vamos a ver ahora los efectos deletéreos del glifosato sobre especies bacterianas que habitan los cuerpos de muchos animales (y que son importantes en su inmunidad, su desarrollo o su reproducción) y sobre especies bacterianas que establecen importantes relaciones mutualistas con las plantas.

Hablaremos de, 1) los efectos sobre las especies de *Pseudomonas*, bacterias beneficiosas para las plantas que evitan la invasión del suelo de bacterias, hongos y otros parásitos y patógenos y 2) los efectos sobre *Lactobacillus*, un simbiote habitual de nuestro cuerpo y de otros vertebrados, 3) los efectos sobre *Escherichia coli*, bacterias esencial en la digestión y la salud de sistema inmune humano y de muchos vertebrados y 4) los efectos del glifosato sobre la que quizá sea una de las bacterias simbiotes más extendidas en el mundo animal: *Wolbachia*.

Pseudomonas es un género de bacterias mayoritariamente habitante de los suelos y que solo, esporádicamente, adopta formas patógenas en humanos y otros organismos. De hecho, es uno de los principales géneros de bacterias beneficiosas para las plantas. Una de las formas que tienen de ejercer este servicio a los vegetales es produciendo pirrolnitrina, un importante y potente metabolito antifúngico, que requiere del aminoácido aromático triptófano para su síntesis. Recordemos que el glifosato es un inhibidor de una de las rutas que utilizan bacterias y plantas para sintetizar aminoácidos aromáticos.

Otras especies de pseudomonas producen metabolitos similares a la auxina, una hormona vegetal esencial para el crecimiento del organismo que se produce en los meristemas apicales y que funciona, activando los resortes genéticos necesarios para elongar las células de la planta. En pocas palabras: hace que la planta crezca. Esta especie de "auxina bacteriana" sintetizada por *Pseudomonas* ayuda también al crecimiento radicular. Molecularmente, es similar a la pirrolnitrina y, como no podría ser de otra manera, también necesita al triptófano como aminoácido precursor. Ludmilla Aristilde y sus compañeros del departamento de ingeniería biológica y ambiental de la Universidad

de Cornell (Ithaca, EE.UU.), partiendo de estos hechos indagaron sobre los suelos tratados por largos periodos de tiempo con glifosato y, una vez que comprobaron que existía una correlación positiva entre el tratamiento con glifosato, baja producción de análogos de la auxina y de pirrolnitrina en el suelo, poblaciones reducidas de pseudomonas y poblaciones grandes del hongo patógeno de plantas *Fusarium* spp., se propusieron indagar cómo afectaba el glifosato sobre el crecimiento poblacional de las pseudomonas, cómo afectaba a la ruta *Shikimica* de las bacterias y si existían otras rutas metabólicas afectadas por el glifosato en estas bacterias. Para hacerlo, estudiaron tres especies de pseudomonas y usaron glifosato molecular (no preparados comerciales). Dos son las conclusiones básicas del trabajo:

Los efectos del glifosato sobre el crecimiento de las pseudomonas depende, tanto de la dosis, como de la especie. *Pseudomonas putida* (una bacteria fundamentalmente edáfica y muy usada en la industria genética) es muy sensible, mostrando una reducción de más del 27% de su tasa de crecimiento a una concentración baja (8.5 µg/mL equivalente a 8.5 ppm⁶⁹) y nulo crecimiento o un crecimiento reducido a la mitad (dependiendo de la cepa) a una concentración diez veces mayor. Por su parte *P. protegens* (también edáfica y productora de compuestos antimicrobianos⁷⁰) y *P. fluorescens* (también produce secreciones antifúngicas que previenen la aparición de los hongos del género *Fusarium* o *Phytophthora*, patógenos para plantas, y también produce moléculas que mantienen a raya a los nemátodos fitófagos) no mostraron cambios en su tasa de crecimiento con ninguna de las dos dosis.

El glifosato causa relevantes y generalizadas perturbaciones en el metabolismo. Esta afirmación es general para todas las especies analizadas. En todas ellas los autores demostraron que algún aminoácido variaba su concentración a tan solo 8.5 µg/mL. No siempre se trataba

69 Para no perdernos con las unidades, recordemos que partes por millón (ppm), mg/L o µg/mL son equivalentes.

70 Son compuestos que han mostrado efectividad contra patógenos vegetales como la pyoluteorina y el DAPG o 2,4-diacetilfolorglucinol, cuya síntesis también depende de aminoácidos aromáticos, como los ya comentados análogos de la auxina y de pirrolnitrina

de aminoácidos aromáticos dependientes de la ruta *Shikimica*. Esto puede explicar porqué las tasas de crecimiento no se ven afectadas pero, a largo plazo, la presencia en los campos de las diferentes especies puede cambiar. Por ejemplo *P. fluorescens* que no parecía inmutarse con dosis altas de glifosato y, sin embargo, a dosis bajas veía reducida su capacidad sintética de los aminoácidos valina y timidina, ambos aminoácidos esenciales.

Una inferencia realista sobre estos datos es que el uso de glifosato de forma continuada podría estar reduciendo la productividad de los campos a través de la reducción del número y la diversidad de especies microbianas beneficiosas en el suelo y el aumento de aquellas patógenas. Es más, cabe preguntarse ¿Es posible que, detrás de algunos datos contradictorios con respecto a la productividad de ciertos cultivos orgánicos, que parecen mostrar productividades similares a los cultivos dependientes de glifosato (como los cultivos de organismos modificados genéticamente), se esconda este mecanismo?⁷¹

Vamos con los otros dos ejemplos. *Escherichia coli* es una bacteria gram negativa⁷² del grupo de las enterobacterias⁷³, presente en la mayoría de vertebrados endotermos y homeotermos y que, pese a tener una naturaleza anaerobia, tolera medios aerobios.

Brigitta Kurenbach y sus colaboradores de la Escuela de ciencias biológicas de la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda), y de otros centros, trabajaron la hipótesis de que dosis subletales de preparados

71 Ver, por ejemplo, el trabajo ya citado de Seufert *et al.* (2012).

72 Esto significa que no poseen una gruesa pared de mureína (un polisacárido) para proteger sus membranas. Por contra, el grosor de la lámina de mureína es pequeño. Esta "capa fina" se sitúa entre una doble membrana y una capa externa de oligosacáridos que suele protegerlas contra los sistemas inmunes de los vertebrados. Como veremos *Lactobacillus* es gram positiva y esto implica que no posee oligosacáridos en la membrana externa, y si una gruesa pared de mureína a modo de coraza. Esta es una división básica entre diferentes tipos de bacterias.

73 Bacterias que habitan fundamentalmente tractos intestinales y orificios de vertebrados. Fuera de estos lugares pueden producir infecciones y ser bastante agresivas e invasivas. Además, podemos encontrarlas en formas latentes o reproduciéndose en otros ecosistemas.

comerciales de glifosato⁷⁴ producen estrés en enterobacterias. El estrés es capaz de activar mecanismos moleculares defensivos en bacterias. Por ejemplo, estar expuestas a oxidantes puede elevar la concentración en la membrana de bombas proteicas capaces de desintoxicar el medio intracelular. Estas bombas no solo son capaces de extrudir esos oxidantes, si no que son capaces de vaciar el medio intracelular de otras sustancias. También se induce la expresión de otras bombas. Todo ello lleva a que, por ejemplo, una bacteria estresada resista mejor la acción de los antibióticos. Es lo que se ha venido a llamar como *resistencia adaptativa* o *fenotípica* a los antibióticos⁷⁵. ¿Ocurre esto en *Escherichia coli*? Así lo demostraron. A bajas concentraciones de preparado comercial de glifosato, en un rango de 0.03-30 µg/mL, *E. coli* aumenta su resistencia a los antibióticos ampicilina, ciprofloxacino, cloranfenicol y tetraciclina. Este mismo efecto, con más o menos antibióticos implicados, y concentraciones distintas, lo observaron con otros dos herbicidas comerciales: Kamba y 2,4-D⁷⁶.

Por su parte, las bacterias del género *Lactobacillus* son unas bacterias gram positivas, anaerobias y/o microaerófilas (es decir, toleran bajas concentraciones de oxígeno) que son conocidas por realizar, fundamentalmente, la fermentación láctica para la obtención de energía. Muchos vertebrados mantenemos poblaciones importantes de *Lactobacillus* en el tracto digestivo, en la piel o en los genitales. Es, además, un género de bacterias presente en los productos lácteos fermentados y es, por ende, la principal especie probiótica presente en la alimentación humana. Además, su presencia en nuestra biota intestinal y dermatológica parece

74 En este caso era Roundup®

75 El concepto proviene del trabajo de Corona y Martínez (2013). Esta resistencia fenotípica puede ocurrir mediante la interacción de varias especies bacterianas, respondiendo aquella que era sensible a un antibiótico, a las sustancias segregadas por otras especies capaces de crecer en ese ambiente. Esto incluye mecanismos evolutivos de cooperación. Es esencial comprenderlos porque están detrás del auge de las resistencias a antibióticos. Estos procesos evolutivos de resistencia a los antibióticos tienen su campo de entrenamiento en las granjas productoras de carne.

76 También observaron estos efectos en la bacteria patógena *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium*, causante del tifus.

ser esencial para prevenir infecciones en los genitales, los eccemas y frenar infecciones diarreicas, como recoge Inglin (2017), y algunas especies presentes en nuestro tracto intestinal son capaces de sintetizar moléculas terapéuticas, como las citoquinas o algunos antígenos que estimulan al sistema inmune⁷⁷. ¿Qué ocurre cuando estas bacterias se ven expuestas al herbicida glifosato? Emilie Clair del Instituto de biología de la Universidad de Caen Basse-Normandie (Francia) y sus colaboradores investigaron este asunto. Estudiaron el comportamiento del glifosato y sus formulaciones comerciales en *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus*. Observaron que, a concentraciones de 600 µg/mL la turbidez del medio de cultivo (una medida usada habitualmente en bacteriología para estimar el número de células presentes por unidad de volumen) se reduce a la mitad del valor de cultivo en estado estacionario⁷⁸. Esto quiere decir que hay aproximadamente la mitad de células bacterianas. Es lo mismo que decir que el glifosato ha matado a la otra mitad. De hecho, a 1000 µg/mL prácticamente no hay turbidez. Exterminadas. En contraposición, observamos que los efectos son mucho menores cuando el glifosato es utilizado en formato molecular (sin los coadyuvantes propios de las preparaciones comerciales). Pero es que, además, hay otros microorganismos simbióticos y/o comensales de los animales que se ven afectados por la presencia del glifosato y de sus preparaciones comerciales en nuestros cuerpos. Por ejemplo *Geotrichum candidum* es un hongo habitual de nuestra biota. Presente en piel, cavidades y tracto digestivo. Juega un papel (todavía por investigar en profundidad) en el buen estado del conjunto de la comunidad microbiana en el ser humano y en nuestra la capacidad

77 El trabajo de Rebeca Martín *et al.* (2013) solamente es uno de los múltiples trabajos que se pueden consultar y que revelan la importante relación existente entre la microbiota intestinal de un animal y su vida.

78 En este trabajo utilizaron la formulación comercial de Roundup®. El estado estacionario de un cultivo bacteriano se refiere al estado en el cual el cultivo iguala el número de de bacterias que “nacen” y mueren. Si lo trasladamos a turbidez, el cultivo deja de volverse más turbio. No van a haber un mayor número de células. Tampoco un menor número.

inmune⁷⁹. Según el trabajo de Emile Clair esta especie de hongo sería incluso más sensible que *Lactobacillus* a los preparados comerciales de glifosato y al propio glifosato molecular.

Y en este contexto podemos hablar de lo que ocurre cuando la bacteria *Wolbachia* se encuentra con el glifosato. Esta bacteria es esencial para un sin fin de especies de artrópodos (y algunos nemátodos). Algunos trabajos de revisión, como el de Wieslaw y Ramakrishna (2007), sitúan entre el 25 y el 70% de las especies de artrópodos como potenciales portadoras de bacterias de este género. Muchas de estas especies no pueden reproducirse sin su presencia⁸⁰. En algunas especies de insectos (sobre todo culícidos y otras familias de insectos hematófagos y transmisores de viriasis) la presencia de *Wolbachia* en los tractos genitales de las hembras produce un sesgo en la descendencia hacia un mayor número de hembras⁸¹. Familias enteras de insectos (como la familia de los pulgones) necesitan de esta bacteria para reproducirse. Los pulgones son organismos partenogenéticos y han desarrollado esta capacidad gracias a una versión extrema del proceso evolutivo mutualístico establecido con la bacteria⁸².

Pues bien, la evidencia sobre los efectos deletéreos del glifosato sobre *Wolbachia* se ha ido acumulando los últimos años. Por ejemplo, Matti Leponiemi y sus colegas de la Universidad de Graz (Austria) han demostrado que concentraciones de 100 ppm afectan a la producción

79 Por ejemplo, se puede consultar el trabajo experimental de Noor-UI *et al.* (2020) de la Academia China de las Ciencias. Este hongo también es el responsable de infecciones cuando la microbiota no se encuentra en buen estado o cuando la persona se encuentra inmunodeprimidas.

80 Algunos trabajos de campo, como el de Werren *et al.* (1995) sitúa el porcentaje de especies de artrópodos efectivamente habitadas por *Wolbachia* en el 17% (al menos en la región neotropical).

81 Esto se está intentando utilizar en algunas técnicas de modificación genética, como los impulsores genéticos, para intentar esterilizar a poblaciones enteras de insectos vectores de enfermedades.

82 Recordemos que, a su vez, un gran número de especies de hormigas se asocian con pulgones en relaciones complejas. Todas tienen en común que, si el pulgón se ve afectado negativamente, la hormiga también. Por ejemplo, en Suay-Cano *et al.* (2002) comprobaron que en la provincia de València (España), con una superficie de 10841,82 km², se encontraron al menos 224 asociaciones diferentes entre una especie de pulgón y otra de hormiga.

de crías y a la morfología de las mismas en la especie de hormiga *Cardicondyla obscurior* y que el mecanismo probable de esta distorsión se encuentre en la afección, también demostrada, sobre *Wolbachia*.

Persistencia del glifosato en el suelo y su incidencia en las interacciones mutualistas entre hongos y plantas

El ser humano a logrado domesticar plantas para su cultivo, al menos, nueve veces de forma independiente a lo largo de su historia⁸³. Siempre nos hemos fascinado al ver cómo lográbamos reproducir y mejorar la producción de unos organismos de los cuales, en principio, nos alimentaban esporádicamente y, cuyos frutos, recolectábamos aquí y allá para completar nuestra omnívora dieta. Como ha ocurrido en múltiples ocasiones a lo largo de nuestro recorrido específico por este planeta, hemos intentado explicar nuestro entorno con relatos, metáforas e imágenes que nos facilitaran asimilar la complejidad del cosmos. Así sentíamos cierto control sobre nuestras vidas. Los poderes sobre naturales nos quitaban cosas, manejaban nuestro destino y nos acompañaban antes, durante y después de nuestras vidas. El pensamiento mágico ha tenido una clara función social a lo largo de nuestra historia evolutiva como una forma de cohesión grupal y una herramienta hermenéutica.

Por ejemplo, en la mitología romana Ceres era la diosa que enseñó a los seres humanos el arte de cultivar la tierra, de trabajarla, de recoger sus

83 En primer lugar decir que es muy difícil establecer el “inicio de la agricultura” en un determinado lugar. El conocimiento de la reproducción diferencial de algunas plantas (el comienzo de la domesticación) siempre precede al uso de la agricultura como forma de obtener alimentos para la subsistencia. Su adopción como forma social no está relacionada con el conocimiento de cómo cultivar, sino sobre si es “rentable” su uso, sabiendo que la adopción por la sociedad conlleva, probablemente, que esta ya se esté estratificando y complejizando. Este problema ha sido analizado en múltiples obras, pero para saber más podemos consultar Diamond (2010) o McKeown (1990). El consenso sobre los inicios independientes de la agricultura parece situarlos entre los 8500-7500 a.n.e en el continente Euroasiático (Creciente fértil y China), con un origen también coetáneo en Nueva Guinea. Posteriormente se iniciaría de forma independiente en el continente africano, en el 5000 a.n.e (y un inicio no determinado, pero independiente, en Etiopía), y en tiempos más cercanos a la actualidad, 3500-2500 a.n.e, en el continente americano (con 4 puntos de inicio independientes: Mississipi, Meseta Mexicana, macizo de las guayanas y en la cordillera de los Andes).

frutos y de poder elaborarlos para conseguir comida de mayor calidad. En definitiva, era la diosa de la agricultura. A su cargo, tenía doce dioses menores: dioses de la preparación de la tierra, del arado, de la siembra, de la escarificación, del barbecho, del clareo, de la cosecha, del almacenado y de la distribución. En Arcadia, una región de la Grecia clásica ocupada como las demás por los romanos, los figalios (el pueblo que habitaba mayoritariamente la región) elaboraron una estatua de Ceres llamada “la Ceres negra”. Todo el mundo puede imaginar qué color tenía. La estatua, posteriormente, se quemó en un accidente en el templo dedicado a ella. ¿Qué ocurrió? Cuenta la leyenda que los figalios olvidaron a Ceres y dejaron de rendirle culto. Por ello, fueron castigados con escasez; una escasez de agua que duró hasta que fue repuesta la estatua y su culto. Así explicaron los figalios lo que ocurrió. Cuando hablamos de los hongos, en general, la mayor parte de la gente piensa en cuerpos fructíferos comestibles de un tipo muy concreto de hongos⁸⁴, o en el moho de nuestras casas pero, por lo general, a los hongos les sucede lo mismo que a la Ceres negra de Arcadia: todo el mundo se ha olvidado de ellos.

¿Por qué nos puede pasar lo mismo que a los figalios? La basta mayoría de las plantas terrestres poseen simbiosis radiculares con hongos que consiguen aumentar varias veces la superficie radicular efectiva de la planta. Estos hongos unidos a las plantas (de diversas formas y maneras) es lo que se conoce como micorrizas, una relación mutua que lleva produciéndose entre estos dos grandes grupos de organismos desde hace unos 400 millones de años⁸⁵. ¿Qué podría ocurrir si esos hongos

84 Lo que comúnmente llamamos setas son, en realidad, los órganos reproductivos, o cuerpos fructíferos, de un grupo de hongos llamados basidiomicetes. También son visibles (y algunos comestibles) los cuerpos fructíferos de los ascomicetes (el otro gran grupo de hongos sobre el planeta), pero con diferencia son mucho menos conocidos y mucho menos buscados culinariamente.

85 El estudio de las especies de hongos actuales que realizan simbiosis micorríticas (el grupo de las glomales) ha dado como resultado una divergencia de los mismos hace 462-353 millones de años mediante el uso de la técnica del reloj molecular. Esto cuadra con la edad de los fósiles de la denominada “*Flora rhynia Chert*” (primera evidencia fósil de esta simbiosis) y con el hecho de que solo los hongos glomales formen endomicorrizas. La taxonomía molecular indica que estos hongos son tienen un origen común y, actualmente, se los prefiere clasificar con un único género (*Glomus*).

simbióticos no pudieran crecer correctamente? En concreto ¿Qué ocurriría si el glifosato perturbase la capacidad de crecimiento y de formación de simbiosis con las plantas de estos hongos beneficiosos? Olvidarnos de ellos podría traernos nuestra particular escasez de cosechas.

Ya hemos visto lo que ocurre con las poblaciones bacterianas del suelo tras la aplicación continuada de glifosato y, en concreto, hemos visto lo que ocurre con el género *Pseudomonas* (tan importantes para evitar la invasión de los suelos por patógenos, tanto bacterianos, como fúngicos). Para poder abordar estas preguntas, previamente, debemos saber cómo es la dinámica del glifosato dentro del suelo.

La forma más lógica que a uno se le puede ocurrir para explicar los aumentos de concentración del glifosato en el suelo es, obviamente, la aplicación de una formulación comercial mediante *spraying* o pulverización. Pero aquí debemos hacernos la primera pregunta: ¿cómo pasa el glifosato más allá de los primeros centímetros del suelo una vez se ha pulverizado? El *spraying* tiende a quedarse en la superficie (primeros 20 cm), afectando allí a los seres vivos que habitan esta capa. Ahora mismo el lector pensará que, obviamente, si tras la aplicación del herbicida llueve, éste será capaz de penetrar en capas más profundas del suelo. Efectivamente. Y la probabilidad de que esto ocurra se incrementa en los campos con plantas resistentes a glifosato porque la aplicación del herbicida es más frecuente en estos casos. Pero hay una vía de penetración profunda en el suelo poco evaluada y que, posiblemente, sea la principal vía de entrada y, lo que es más importante, permanencia de la molécula en el suelo. Aunque parezca increíble, se ha comprobado que un 15% del glifosato aplicado mediante pulverización pasa a través de la planta y es, finalmente, excretado por las raíces. Esta es la hipótesis que manejan Laitinen *et al.* (2007). Esto, en números, se traduce de la siguiente forma: 0.07mg de glifosato excretados por la planta por cada kilogramo de suelo en la zona de la rizosfera tras cuatro días de aplicación.

Teniendo en cuenta otros factores, como el agua gravimétrica y la concentración inicial a la que se aplica el herbicida, se ha estimado que estaríamos hablando de concentraciones de hasta 4 mg/L tras el

exudado de las raíces⁸⁶. Esta evidencia quedaría reforzada por lo mostrado por Marjo Helander *et al.* (2018) en un trabajo de campo sobre la acumulación de glifosato en dos especies escogidas: *Elymus repens*, o grama (considerada una hierba no deseada⁸⁷), y por tanto objetivo del Roundup Gold®, y *Festuca pratensis*, una planta que en principio no crece en los campos de cultivo, y por tanto considerada como no objetivo. Aplicaron el preparado comercial 6 meses antes de sembrar estas dos especies y, tras su crecimiento, detectaron que la concentración del glifosato en las plantas oscilaba entre los 1,89-3,24 mg/Kg. En el suelo todavía quedaban concentraciones de entre 0,24-0,63 mg/Kg. Es una absoluta barbaridad. Las plantas todavía podían capturar ingentes cantidades de glifosato del suelo después de 6 meses sin aplicación del herbicida (de hecho, lo concentraban) y en el suelo todavía permanecía en cantidades importantes.

Pero todavía hay más. La cuestión es compleja. No es lo mismo que el herbicida se aplique directamente sobre el suelo a que éste se incorpore a la planta (por los mecanismos que hemos visto). Doublet *et al.* (2009) han comprobado que la absorción de glifosato por parte de una planta retrasa su posterior degradación hasta 6 veces más tiempo que si el herbicida hubiera caído directamente sobre el suelo. Estar dentro de la planta lo protege⁸⁸. También aumenta considerablemente la concen-

86 En este punto es importante el concepto de adsorción. Las partículas de suelo, sobre todo los suelos arcillas, tienen un tamaño de grano y una composición mineral que facilitan la “captura” de moléculas por parte de estos granos y su “secuestro” temporal, protegiéndolas de la degradación. Es lo que se conoce como “bomba química” en edafología. Los suelos arcillosos son capaces de acumular en sus granos enormes cantidades de moléculas (pesticidas de todo tipo, por ejemplo) y liberarlos de golpe tras una avenida o lluvia copiosa. Esta adsorción también explica que se estimen concentraciones tan elevadas de glifosato en agua disuelta partiendo de concentraciones por kilogramo de suelo relativamente más bajas. El glifosato no se distribuye de forma homogénea en el suelo, sino que estará “agrupado” en algunos granos de suelo o en algunas gotículas.

87 Esta planta ha sido utilizada en Europa para la fabricación tradicional de escobas y es considerada por los ganaderos que pastorean el ganado vacuno como una planta que mejora la calidad y sabor de la leche.

88 En el estudio se analizan el glifosato y la sulcotrina. El seguimiento de la degradación lo realizaron mediante el marcaje con carbono 14 en ambos herbicidas.

tración de AMPA, tanto dentro de la planta en descomposición, como posteriormente en el suelo. Todo este proceso de bioacumulación se ve influido, también, por el tipo de órgano que comienza a degradarse en el suelo: no es lo mismo hojas que tallos. Volvamos a la rizosfera. Es ahí donde, además de bacterias, encontramos a los hongos, muchos de ellos formando estrechas relaciones mutualistas con las plantas. Vamos a explicar un poco más a fondo esta relación que nos permitirá entender un poco más en profundidad la distorsión ecosistémica que produce este herbicida cuando penetra en el suelo (además de entender un poco mejor algunos conceptos expresados anteriormente).

La micorriza es una asociación mutualista entre una, o varias, especies de hongos y una planta. Esta relación comienza cuando el embrión de la planta, encerrado en su semilla, reanuda su desarrollo y comienza a germinar. Cuando todavía no es más que un pequeño plantón, se produce la magia entre el hongo y la pequeña planta. Según Kamel *et al.* (2017) el reconocimiento entre el hongo, que normalmente se halla en el suelo en forma de pequeños propágulos⁸⁹ y el plantón puede darse de diferentes formas: I) en los suelos pobres en nutrientes y/o muy secos pueden llevar a la pequeña planta a emitir una señal de ayuda a su filogenéticamente distante colega de penurias mediante la emisión de sustancias atractivas para el hongo⁹⁰ y, una vez el crecimiento de las hifas es un hecho, el mutualismo se termina de sellar mediante un “engrasado exterior” de ácidos grasos hidroxilados que hacen las delicias de la parte fúngica de la relación. II) en los suelos más ricos, aunque no exclusivamente, la necesidad de “llamar la atención” quizá sea menor. Así que la planta “llama la atención” del hongo de forma pasiva. Es el CO₂ de la respiración, los flavonoides del metabolismo habitual de la planta o, incluso, los ácidos grasos de la cutina que protegen la raíz, los que estimulan el crecimiento de las hifas hacia la planta y abren la

89 Los propágulos fúngicos son una forma de dispersión que tienen los hongos y están compuestos por un pequeño grupo de hifas. Las hifas son la unidad básica de un hongo y están compuestas por hileras de células que tienden a formar filamentos poco agregados entre sí y que solamente se organizan complejamente en la conformación de los cuerpos fructíferos.

90 En concreto se trataría de estrigolactona.

puerta al mutualismo. Aquí el hongo se siente muy atraído por diversos compuestos que emanan del metabolismo de la planta, como el propio CO₂, que estimula el crecimiento de las hifas, o los flavonoides, que aumentan la germinación de esporas del hongo presentes en la cercanía de las raíces (esto ocurre en algunas especies, solo).

Pero es que existen dos formas de realizar este mutualismo. Una forma menos íntima, algo más tosca y más rara en la naturaleza, pero que puede ser utilizado con diversas especies de plantas por la misma especie de hongo micorrízico. Son las denominadas ectomicorrizas⁹¹. Y otra forma, mucho más estrecha de unión, que implica que las células fúngicas y vegetales entren una dentro de la otra. Si, el hongo entra hasta la cocina (casi de forma literal porque va buscando precisamente eso: fotosintatos). Este unión se denomina endomicorrizas⁹² y es la más común.

Pese a ello unas 200 especies que realicen este tipo de micorriza. Al contrario de las ectomicorrizas, que pueden ser realizada por casi cualquier tipo de hongo y en condiciones diversas y flexibles, las endomicorrizas solo son realizadas por este pequeño grupo de hongos de los cuales se sospecha un origen evolutivo común: en el momento en el que las plantas vasculares quisieron enfrentarse a terrenos más áridos y menos nutritivos, tuvieron que asociarse con estos hongos. Éstos son mutualistas obligados: no pueden desarrollarse si no es en unión con la planta porque, entre otras cosas, reciben entre el 4-20% de los fotosintatos que ésta fabrica y han perdido una buena parte de la capacidad de conseguir la comida por sí mismos. También se

91 Entrando más en detalle sobre cómo se forma una ectomicorriza: las sustancias atractivas para el hongo han propiciado la formación de un “manto de tejido fúngico”, o *esporoma*, alrededor de la raíz de la planta. Desde ese manto, parte un “sistema de conexión” a base de hifas que conectará el esporoma y la *Red de Hartig* (conjunto de hifas que crecen entre las células epidérmicas de la planta y las corticales). Es decir, el hongo se intercaliza dentro de la planta, pero no entra dentro de las células de la planta como sí ocurre en el otro modelo.

92 Las hifas, en este caso, penetran las células corticales de la raíz a través de una especialización de la hifa llamada *hifópodo* y, la planta por su parte, modifica la expresión génica, y por tanto el metabolismo de esas células para, al final, tener un lugar perfecto para el intercambio de nutrientes.

les conoce con el nombre de “hongos micorrízicos arbusculares” en la literatura científica. Ahora ya poseemos las herramientas necesarias para comprender qué pasa con estas asociaciones cuando el glifosato penetra en el suelo.

Marcela C. Pagano *et al.* (2023) han realizado una completa revisión sobre los efectos de los pesticidas sobre las simbiosis endomicorrízicas y, además de listar un gran número de trabajos sobre esta relación ecológica y el glifosato, postulan un tipo de hipótesis poco frecuente en la literatura: *“se pueden probar los efectos de esta aplicación [la del glifosato] sobre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). También es pertinente la cuestión de si la inserción de ese gen de resistencia al glifosato en las plantas perjudica (o mejora) el diálogo molecular entre las plantas y los HMA y, por tanto, perjudica el establecimiento de una simbiosis funcional de los HMA, y si la mayor aplicación de glifosato en campos con tales cultivos transgénicos pueden tener un impacto sobre los HMA”*.

Debemos saber que la simbiosis entre estos organismos depende de un ajustado equilibrio entre los metabolitos producidos por las plantas y la cantidad de micronutrientes transferidos por los hongos a las raíces de las plantas. Una bajada en la cantidad de los fotosintatos traspasada (por ejemplo, por una sensibilidad parcial al glifosato de la planta), un cambio del hongo simbiótico, un cambio en la cantidad de rizosfera o en la proporción de micronutrientes alcanzado por el hongo (debido por ejemplo al glifosato) puede dar al traste con esta relación. Y los datos demuestran que, ya sea por efecto directo o indirecto, esto puede estar ocurriendo. Magdalena Druille *et al.* (2013) demostraron que las aplicaciones habituales (0,8-3 L/ha) de glifosato⁹³ producen un descenso brutal en la viabilidad de las esporas fúngicas (del orden de 5,8-7,7 veces menor viabilidad con respecto a un control no tratado) y, que aquellas que conseguían “germinar”, tenían entre 1,42-1,8 veces menor probabilidad de colonizar las raíces de la poácea *Lolium multiflorum*. *“Esto indicaría que la funcionalidad de la simbiosis se vio afectada”* terminan afirmando.

93 En este caso se utilizó glifosato sin más, no un preparado comercial en base a glifosato.

En esta misma línea hay varios trabajos. Belén Vázquez *et al.* (2021) han demostrado que, con aplicaciones similares (0,96-1,92 L/ha) la biomasa y la biodiversidad fúngica caían en picado. Por ejemplo, en los campos de control, se encontraron un total de 20 especies micorrízicas, mientras que en los campos con “tratamiento” de glifosato, habían entre 12 y 8 especies, 1/3 de las cuales no existían en los campos no tratados: el glifosato estaba cambiando también la comunidad fúngica. Y, además, se produjeron cambios en la estructura molecular de la propia comunidad cuando se produjeron tratamientos de repetición sobre los campos. El trabajo de Wilkes *et al.* (2020) señala que los campos donde no se aplicó glifosato presentaban un gran incremento del número de micorrizaciones y que, cada una de ellas, contaba con un mayor número de arbusculos, por lo que ésta era una unión mucho más estrecha y estable. Además detectaron que la biomasa fúngica caía en picado con la aplicación de glifosato y permanecía baja durante meses y/o años. En trabajos previos, como en el de Zaller *et al.* (2014) o el ya citado de Helander *et al.* (2018), ya sea habían visto estos efectos: disminución de la tasa de micorrización de las raíces, disminución de la biomasa de esporas de hongos micorrízicos arbusculares, disminución del número de propágulos y disminución del número de vesículas que se forman en el interior de las células vegetales⁹⁴.

El trabajo citado de Helander *et al.* (2020), es importante por dos razones: I) comprobaron la afección de la relación ecológica entre hongos y lombrices de tierra y cómo esto afectaba a la lixiviación del glifosato hacia partes profundas del suelos (y potencialmente hacia los acuíferos), resultando la aplicación del herbicida en una disminución de la actividad de las lombrices y, esto, en un incremento de la lixiviación del glifosato y AMPA hacia capas profundas; II) el estudio se realizó en invernadero y en una situación controlada y, en concreto, se estudio el tandem *Tribolium repens* y hongos micorrízicos. El *Tribolium repens*, o trebol blanco, es utilizado como método de nitrificación de terrenos

94 Zaller *et al.* (2014) utilizaron la formulación comercial en base a glifosato Roundup® Speed, con 7,2g/L del compuesto y aditivos surfactantes. Se aplicó durante 5 días conforme al manual de uso. Resultó en una aplicación equivalente a 177,8 mL/m²

en baldío y/o para alimentar ganado (forrajeo, combinado con gramíneas). ¿Está perjudicando el glifosato la capacidad de recuperación de nuestros suelos? ¿estos cambios en la biodiversidad fúngica de los suelos pueden estar produciendo un incremento de la presencia y propagación de hongos patógenos de plantas? ¿existe alguna razón para la esperanza o nuestros suelos están condenados?.

Vayamos por partes. Kremer *et al.* (2005), investigaron cómo afectaba la adición de glifosato, en cultivos hidropónicos de soja transgénica, a la biomasa del hongo *Fusarium*, un hongo patogénico de plantas:

“La colonización de las raíces de soja resistente al glifosato por hongos aumentó significativamente después de la aplicación de glifosato (...). Utilizando una técnica de inmunoensayo, el flujo de glifosato detectado en exudados de la soja resistente al glifosato cultivados hidropónicamente fue mayor a 1 µg/planta durante un período de aplicación de glifosato de 16 días”.

El glifosato estaba facilitando una infección. En la misma línea va el trabajo de L.H.S. Zobiolo y sus compañeros del departamento de agronomía de la Universidad estatal de Maringá (Brasil) en el cual demuestran que la aplicación de glifosato sobre diferentes variedades de soja resistente al glifosato, incrementa la invasión de las raíces del hongo *Fusarium* y disminuye la presencia de bacterias beneficiosas del género *Pseudomonas*. Así expresan sus conclusiones:

“El glifosato aplicado a la soja resistente al glifosato, independientemente de la variedad, tiene un impacto negativo en las complejas interacciones de los grupos microbianos, la actividad bioquímica y el crecimiento de las raíces que pueden tener efectos perjudiciales posteriores sobre el crecimiento y la productividad de las plantas”.

Quizá debamos volver erigir, de nuevo, la estatua de Ceres para recordar que, el dios menor del mutualismo edáfico no es tan pequeño y que puede estar detrás de los cada vez más vacuos esfuerzos por incrementar la productividad. En este camino podemos encontrarnos con trabajos como los de Veronica Spinelli *et al.* (2021), en el cual estudian la capacidad del hongo saprófito *Purpureocillium lilacinum* para

resistir la toxicidad del Roundup® y utilizar el glifosato como fuente de fósforo. Este es un hongo muy flexible en su estrategia vital: es capaz de infectar artrópodos, a otros hongos, vivir de los desechos de otros (saprófito) o, incluso, llegar a infectar a humanos inmunodeprimidos. Pero, en el suelo, puede jugar un papel en la detoxificación de campos contaminados. Sin embargo, siempre en las relaciones ecológicas, las capacidades de un organismo son un arma de doble filo (o de múltiples filos): poblaciones descontroladas de este hongo pueden tener efectos indeseados en otra fauna.

Fauna edáfica y Glifosato

Como hemos visto anteriormente, uno de los puntales del procesamiento y recirculación de la materia en el suelo son las lombrices de tierra. Para poder comprender mejor esta importancia y analizar las posibles consecuencias de la disminución de la biomasa de estos organismos en el suelo, vamos a conocer mejor, a través del trabajo de Cindy Hale (2007), los grupos ecológicos en las que se las divide. Las lombrices de tierra pueden clasificarse en tres categorías funcionales: I) Las lombrices epigeas, o lombrices que habitan normalmente la superficie del suelo, que se alimentan fundamentalmente de la materia orgánica que no está enterrada y cuyas características principales son sus altas tasas de reproducción. Viven poco, se reproducen mucho y, dado su “peligroso” estilo de vida (vivir en la superficie), mueren jóvenes. Son las encargadas de construir el mantillo o *humus*, II) las lombrices endogeas viven casi todo el tiempo dentro del suelo, construyendo galerías verticales de decenas de centímetros que recorren en busca de alimento (algunas ingieren todo el sustrato, otras son mucho más selectivas) y, por las noches, salen a depositar los excrementos a la superficie, cosa que también hacen por el resto de las galerías que construyen, removiendo activamente, de esta forma, el suelo, y contribuyendo a su ventilación, y III) las lombrices anécicas, que viven permanentemente en el interior del suelo (concretamente, en sus estratos más profundos) realizando galerías de decenas de metros (ellas mismas llegan a medir decenas

de centímetros). También salen por la noche a realizar deposiciones en la superficie.

Una de las lombrices más conocidas es *Eisenia foetida*, un anélido epígeo predilecto para el compostaje (de hecho, es conocida como lombriz del estiércol) y para los estudios de toxicología ambiental. Muchas pruebas de homologación toxicológica internacional se basan en el uso de esta especie como indicador de posibles sensibilidades ambientales⁹⁵. Correia y Moreira (2010), del centro de estudios de la salud de los trabajadores y de ecología humana (FIOCRUZ) en Rio de Janeiro (Brasil), han trabajado con esta especie de anélido y el herbicida glifosato. Para ello, utilizaron cajas con tierra para intentar imitar una pequeña porción del hábitat natural de *Eisenia* en el laboratorio y midieron la biomasa de lombrices tras los tratamientos. Utilizaron, además, diferentes concentraciones de glifosato y diferentes tiempos de exposición. ¿Qué encontraron? En todas las dosis utilizadas, el glifosato mostraba efectos significativos sobre la biomasa de *Eisenia foetida*. Concretamente, en el tratamiento de 56 días (en todas las concentraciones de glifosato utilizadas) se producía una disminución de más del 50% la biomasa de lombrices⁹⁶. Esta reducción iba decreciendo según se acortaba el tiempo del tratamiento. Queda mucho más claro si citamos directamente a los autores:

“la exposición a largo plazo al suelo contaminado con glifosato demostró un efecto tóxico sobre el desarrollo normal y la reproducción de «Eisenia foetida», lo que indica que esta sustancia puede tener efectos tóxicos significativos en la biota del suelo”.

De hecho una revisión de tres estudios de toxicidad aguda del preparado comercial en base a glifosato Groundclear®, realizada por Verrell y Buskirk (2004) puso de manifiesto que “*parece alterar el comportamiento motriz de una manera que puede comprometer la supervivencia [de las lombrices]*”. Esta especie de anélido, *Eisenia foetida* (y otras), son

95 Es usado por la ECHA europea, por la FDA estadounidense y por los organismos análogos de la OCDE, como algunas organizaciones privadas de homologación de estándares.

96 Las concentraciones utilizadas oscilaron entre las 10 y las 1000 ppm.

típicas de suelos con humus y, por tanto, no están presentes de forma frecuente en los agrosistemas. Los daños sobre la especie los podríamos observar en lindes de bosque con los campos de cultivo o por *spraying* a distancia (o quizá en campos de cultivo de gestión integrada, que sigan otras metodologías y donde el humus pueda acumularse)⁹⁷. Pero, ¿qué ocurre con los anélidos dentro del propio agrosistema?

Springett y Gray (1992) estudiaron hace décadas los efectos (en condiciones controladas de laboratorio), sobre una especie de lombriz anécica, *Aporrectodea caliginosa*. Estudiaron los efectos de varios pesticidas. Todos ellos resultaron ser deletéreos a concentraciones de uso en el campo, a concentraciones más bajas y a combinaciones de distintos pesticidas⁹⁸. En concreto, el glifosato produjo, en estos tratamientos, un retraso en el tiempo de madurez sexual en la lombriz que se multiplicaba por dos (de 25 días en el control pasó a ser de 55 días), para concentraciones bajas y medias (0,7 g/ha y 1,4 g/ha) y, directamente, no se produjo la madurez sexual en todo el tiempo del experimento (100 días) para concentraciones altas (2,8 g/ha). Los autores recogen que el ratio de uso agrícola para el glifosato es de 14,4 g/ha. Es absolutamente impresionante que estos hechos no hagan plantearse a muchas personas la hipótesis de que, en el medio plazo, su cultivo de OMG no esté funcionando, entre otras razones, porque los encargados de regenerar el suelo son sistemáticamente neutralizados por el herbicida que están aplicando.

Por su parte, Mohssen Morowati ha investigado las posibles causas de inmadurez sexual y de lento crecimiento cuando otra especie de lombriz, *Pheretima elongata*, crece en un suelo con glifosato. Esta especie es típica del este del continente Euroasiático y es endogéica. Para su estudio, Morowati utilizó el componente activo directamente (y no preparados comerciales), aplicando la concentración prescrita por el fabricante. ¿Qué descubrió? “*Se puede concluir con seguridad*” dice Morowati “*que la dosis de campo recomendada de glifosato es perjudicial*

97 Por ejemplo, la agricultura regenerativa.

98 Es muy habitual utilizar más de un pesticida durante el proceso productivo de un cultivo moderno tras la llamada “revolución verde”.

para «*Pheretima elongata*», causando cambios histoquímicos severos y lesiones histopatológicas en el revestimiento intestinal y causando al menos un 50 por ciento de mortalidad en la población de lombrices” y, más extensamente, realiza la siguiente reflexión:

“Se ha demostrado que las lombrices son animales muy beneficiosos para los agricultores y son útiles en acciones tales como la fragmentación y descomposición de materia orgánica vegetal, aumento de la fertilidad del suelo, cambio de la estructura del suelo, mezcla completa del suelo, aireación del suelo, etc. Estas actividades dan como resultado rendimientos más altos de los cultivos, sin contaminar el medio ambiente. Si las lombrices de tierra están ausentes o en un estado mermado, los agricultores se ven obligados a usar productos químicos como fertilizantes, pesticidas, etc., para aumentar los rendimientos de sus cultivos. Está muy claro que el uso de estos productos químicos puede tener un impacto destructivo sobre el medio ambiente y causar daños irreversibles. Es muy importante cuidar las lombrices y mantener su ambiente seguro. Por lo tanto, se sugiere que, en la medida de lo posible, el uso de glifosato debe restringirse”.

Pero quizá el trabajo más revelador sobre los efectos del glifosato sobre las lombrices de tierra lo realizaron Mailin Gaupp-Berghausen y sus colaboradores de la Universidad de recursos naturales y ciencias de la vida de Viena (Austria). Compararon lo que les ocurría a dos especies de lombrices funcionalmente distintas y, posteriormente, observaron qué ocurría con los nitratos y los fosfatos en esos suelos tras la aplicación del glifosato transcurridos los potenciales efectos sobre las lombrices. Concretamente trabajaron con *Aporrectodea caliginosa* (ya hemos hablado de ella) y con *Lumbricus terrestris*, la lombriz de tierra más conocida en Europa (ejemplo claro de lombriz endogeica)⁹⁹.

Para ambas especies, se realizaron sendos tratamientos con Roun-

99 Sus trabajos se realizaron en mesocosmos creados al uso, en el laboratorio. La diferencia con los casos anteriores es que no eran cajas donde la profundidad del suelo estaba limitada, si no que son imitaciones más realistas de perfiles de suelos, permitiendo un comportamiento natural, en cuanto a funcionalidad, de las especies de lombrices.

dup Alphée® y Roudup Speed®, realizando la aplicación tal y como sugiere el fabricante, pero con concentraciones entre un 53-62% menores a las recomendadas. ¿Qué observaron? En primer lugar demostraron que la producción de mantillo procesado (las deyecciones nocturnas de las que hemos hablado) en la especie endogeica (*Lumbricus terrestris*) se vio claramente alterada. En números totales, la cantidad de material depositado en superficie por esta especie disminuyó un 46% con el tratamiento. Y cuando estudiaron qué ocurría con el éxito reproductivo de ambas especies, comprobaron que éste se vio notablemente afectado por la aplicación del glifosato.

El estudio termina planteando el siguiente reto futuro: por un lado, tener en las manos un herbicida capaz de eliminar la competencia que pueden producir los vegetales no deseados sobre los cultivos, aumentando así la productividad, y por el otro, una sustancia capaz de reducir la biomasa de los organismos terrestres útiles, responsables a su vez, de mantener en un estado óptimo el suelo, reciclando los nutrientes, evitando la lixiviación de los mismo y manteniendo la productividad. “Los hallazgos de nuestro estudio indican claramente que se debe prestar más atención a los pesticidas en busca de posibles efectos secundarios ecológicos indeseables [...]” sentencian en su trabajo.

Tras las lombrices de tierra, y compitiendo con ellas en importancia ecológica, encontramos a los nemátodos. Los nemátodos son un grupo de animales muy interesante, tanto desde el punto de vista evolutivo¹⁰⁰, como desde el punto de vista ecológico. Los nemátodos son pequeños organismos vermiformes, la mayoría de ellos diminutos, sencillos, y que en no pocas ocasiones han adaptado sus ciclos vitales al

100 Los nemátodos siguen un desarrollo embrionario similar a los artrópodos. Es por ello que tradicionalmente se les ha considerado grupos estrechamente relacionados. Siendo esto así, su posición filogenética todavía no está demasiado clara. Existirían dos hipótesis principales. En una primera hipótesis, los filos de tardígrados, onicóforos y priapúlidos serían los grupos hermanos de un grupo formado por los filos de artrópodos y nemátodos (hipótesis tradicional). En una segunda hipótesis el grupo hermano de los artrópodos serían los onicóforos, y los nemátodos estarían más relacionados con tardígrados y priapúlidos.

parasitismo¹⁰¹. Precisamente esta característica es la que permite que, algunas especies (las parásitas) sean un poco más conocidas. Todo el mundo ha oído hablar de las “lombrices” que suelen tener los niños por jugar en parques con tierra contaminada con los huevos del nematodo *Ascaris lumbricoides*. Muchos ganaderos tienen que estar pendientes de que su ganado no vea disminuida su producción por la presencia en los animales de nematodos parásitos. Pero ¿Qué hay de las 25000 especies de nematodos identificadas? De esas 25000, solamente 60 infectan a humanos y, solamente sumarían unos pocos centenares si añadimos aquellas que parasitan a vertebrados. Tendemos a despreciar, en una lógica antropocentrista, este conjunto de miles de especies de vida libre que tienen un importante rol en la estabilidad de las poblaciones de organismos en nuestros suelos.

En el suelo es donde encontramos la mayor diversidad de nematodos. De hecho, al igual que ocurre con los anélidos, éstos se clasifican ecológicamente según su comportamiento y funcionalidad. En un trabajo ya clásico encabezado por G. W. Yeates, publicado en *Journal of Nematology* en 1993, se obtuvo una clasificación ecológica de los nemátodos en 5 grupos funcionales: I) Depredadores y parásitos vegetales; II) Fungívoros, o depredadores de hongos; III) Bacteriófagos, o depredadores de bacterias; IV) Comedores de sustrato; V) Depredadores (de otros nematodos u otros animales). Además de estos, hay otros dos grupos ecológicos, que son los entomopatógenos (parásitos de insectos), muy importantes en agrosistemas y en el mantenimiento del equilibrio ecológico (son nematodos que, parte de su ciclo vital, lo desarrollan dentro del cuerpo de insectos), y los depredadores de algas, de mayor importancia en suelos húmedos y soleados.

¿Qué ocurre con la biodiversidad de estos grupos funcionales de nematodos cuando un suelo es sometido a tratamientos de herbicidas como el glifosato? ¿hay algún grupo que se vea más afectado

¹⁰¹ Algunos necesitan de un hospedador solo para algunas fases de su vida, otros han llegado a convertirse en parásitos a lo largo de todo su ciclo vital.

que otro? La primera cuestión fisiológica que llama la atención de los nemátodos es que, durante todas las fases de su ciclo vital (el huevo y las diversas ninfas que van mudando hasta llegar al adulto), poseen una cutícula muy refractaria a cualquier sustancia exterior. Es decir, por regla general, son organismos que van a resistir bien los ambientes extremos y las sustancias agresivas.

La literatura científica disponible sobre los efectos de los herbicidas sobre las poblaciones de nemátodos de vida libre es bastante limitada. Ulu *et al.* (2016) han encontrado que hay sensibilidad diferencial en algunos géneros de nematodos entomopatógenos¹⁰². Todavía se está lejos de demostrar un nexo causal entre distorsiones en la comunidad de nemátodos producidas por el glifosato y un incremento en la probabilidad de que se produzcan plagas de insectos debido a la eliminación de estos enemigos naturales y sin embargo el indicio lo tenemos en este estudio.

Para que veamos hasta que punto las interacciones complejas entre múltiples actores definen el resultado final cuando se introduce una sustancia bioactiva como el glifosato, los autores de este trabajo también testean los efectos del Roundup® sobre la virulencia de estos nemátodos parásitos de insectos. Parece ser que la capacidad de penetrar en los cuerpos de los insectos de los nemátodos no depende de su naturaleza como especie, si no de las bacterias endosimbiontes que poseen. Éstas son en última instancia las que provocan la muerte del insecto. La muerte del insecto por esta bacterias emitiría una “señal” que induciría a otros nematodos presentes en el suelo a acudir ante el cadáver para completar también su ciclo en él, reproducirse (recoger bacterias endosimbiontes) y dispersarse. Y, como ya hemos mostrado, las bacterias son sensibles al glifosato¹⁰³. Además, en este trabajo,

¹⁰² En este trabajo se ha visto que *Heterohabditis* es mucho más tolerante al glifosato que *Steinernema*. Ambos géneros han sido tradicionalmente usados en el control de plagas de insectos que afectan a los cultivos.

¹⁰³ En el caso del género de nemátodo *Steinernema*, las bacterias simbiotas son del género *Xenorhabdus* y el trabajo de Ulu *et al.* (2016) demostraría su mayor sensibilidad al glifosato. De ahí su mortalidad diferencial.

también se demuestra que los nematodos fitoparásitos son menos sensibles al glifosato que los entomopatógenos.

Todas estas informaciones combinadas, nos llevan a plantear la siguiente hipótesis: el glifosato puede perturbar el equilibrio existente entre diversas familias de nematodos existentes en el suelo. ¿Puede ser eso cierto? La evidencia disponible no es abundante y hay discusión sobre si el efecto de los herbicidas en general, y de las formulaciones comerciales de glifosato en particular, es grande, pequeño o inexistente, pero la hipótesis es legítima con estos resultados en la mano.

Vamos a realizar una breve discusión sobre el asunto. Dennis *et al.* (2018) realizaron una batería de pruebas toxicológicas en suelos para comprobar los efectos de varios plaguicidas, entre los que se encontraba el glifosato, sobre las bacterias y los nematodos allí presentes. Encontraron que el glifosato no tenía efecto, ni sobre la biodiversidad bacteriana, ni sobre la de nematodos. Es curiosos. Este es un *paper* publicado en la revista *Scientific reports*, del grupo *Nature* (de máximo prestigio académico en occidente). Y vemos que ya de inicio contradice buena parte de la evidencia disponible (incluida la descripción toxicológica realizada por las propias instituciones reguladoras) sobre los efectos del glifosato en las bacterias. Pero es que el trabajo, desde el humilde punto de vista de este autor, tiene graves problemas metodológicos. Por citar el más grueso de todos: parte de muestras de suelo de 100 gramos con índices de Simpson cercanos a 1. Si el índice es igual a 1 indica que la muestra contiene solamente un ítem. ¡Una especie! Conforme nos acercamos a cero, el número de ítems se vuelve asintóticamente infinito. ¿Cómo entonces esperaban los experimentadores ver si hay, o no, efecto de los herbicidas utilizados sobre la diversidad de especies de nemátodos en esos 100 gramos de suelo si partían de muestras con una sola especie de nemátodo?

Sin embargo, con los propios datos del trabajo, ya vemos que hay al menos cuatro familias de nemátodos que cambian evidentemente su abundancia relativa respecto al control. Es decir, sí que hay grupos taxonómicos sensibles al glifosato, aunque

el relato escrito en el resumen del informe y en la discusión del mismo sea otro.

Un trabajo metodológicamente mejor (que incluye, por ejemplo, muchas más familias de nematodos estudiadas y un largo periodo de estudio) confirma que hay algunas familias sensibles al glifosato. Konanani B. Liphadzi, y sus colaboradores del departamento de agronomía de la Universidad estatal de Kansas (EE.UU), midieron durante dos años (y con una periodicidad mensual) la diversidad de nemátodos en suelos cultivados y no cultivados. Encontraron que existían pequeñas diferencias significativas entre la densidad cúbica de nemátodos en estos suelos (era mayor en los suelos expuestos a herbicidas y otros fitosanitarios) y en la diversidad biológica (era mayor en los suelos no expuestos). A Su vez, no encontraron diferencias entre la diversidad de nemátodos en los cultivos tradicionales y en los cultivos con plantas resistentes al glifosato.

Por su parte, un trabajo encabezado por Akhona Mbatyoti, de la Unidad para el manejo de las ciencias ambientales, del a Universidad de Potchefstroom (Sudáfrica), y publicado en 2018, encontró una disminución gradual de la biodiversidad de los nematodos no parásitos en función de la agresividad de la intervención agrícola humana en el suelo: en promedio hallaron 28 géneros de nematodos en suelos sin cultivar, 23 en suelos con un modelo convencional de agricultura y 21 en suelos agrícolas donde se producían plantas resistentes a glifosato.

La evidencia disponible, como vemos, todavía es muy débil para realizar grandes afirmaciones. Por otr lado, además de las lombrices de tierra y los nemátodos (con un importante papel en el ciclo de reciclaje de la materia orgánica como hemos visto) el suelo es habitado por otros muchos filos animales. Para no extendernos demasiado, vamos a limitar el análisis a otro grupo animal con cierta importancia en el control natural de poblaciones de saltamontes (y otros insectos del grupo de los ortópteros).

Los nematomorfos son un grupo de parentesco incierto, aunque morfológica y etológicamente, muy similares a los nematodos. Al igual que ellos, son vermiformes y están recubiertos por

una cutícula. Internamente, sin embargo, tienen una organización completamente distinta. También, al igual que los nematodos entomopatógenos, parasitan insectos. Concretamente, los nematomorfos, en sus formas larvales, parasitan saltamontes, mangostas y algunos crustáceos decápodos.

En teoría, dada su función ecológica, si el glifosato fuera dañino para estos organismos los nematomorfos no podrían controlar bien las poblaciones de ortópteros. Esto es, exactamente, lo que han encontrado Cecilia L. Achiorno y sus colegas de la facultad y el museo de ciencias naturales de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina). A concentraciones mucho más bajas que las de uso agrícola (en este caso 0,176 mg/L), se observó una mortalidad del 50% en adultos de la especie de nematomorfo *Chordodes nobilii* durante una exposición de 96h al glifosato. *Chordodes nobilii* es una especie cuyas larvas parasitan insectos cercanos a ambientes de aguas dulces mientras que los adultos son de vida libre. Por tanto, también pueden verse afectadas las larvas durante el desarrollo si éstas están en contacto con aguas que contengan glifosato. Los autores encontraron que "aunque el desarrollo embrionario no fue inhibido, hubo una disminución significativa en la capacidad infecciosa de las larvas derivadas de huevos que habían sido expuestos a concentraciones superiores a 0,1 mg/L. Se obtuvieron resultados similares para larvas directamente expuestas". Pese a ello, debemos reconocer que estas concentraciones tan elevadas no suelen encontrarse en cursos de agua o suelos, a no ser que sea en las zonas de exposición y de reciente aplicación.

EXCURSO 1: *Caenorhabditis elegans* y el sistema nervioso

Los trabajos de campo, como hemos visto, son escasos. Sin embargo, hay un nemátodo utilizado como modelo en biología sobre el cual se han hecho múltiples experimentos y que nos descubre el potencial dañino del glifosato (y sus formulaciones comerciales) sobre la fauna edáfica y nos abre la puerta de lo que parece cada vez más una evidencia con más respaldo empírico y que, a su vez, da terror ir comprobando que se acumula la evidencia en favor de ella: el glifosato estaría detrás del incremento de la probabilidad

de padecer Parkinson (y otras enfermedades neurodegenerativas).

¿Quién es *Caenorhabditis elegans* y qué nos cuenta sobre el deterioro del sistema nervioso? Es el nemátodo más famoso del mundo entero desde que en 1963 el biólogo sudafricano Sydney Brenner lo propuso como modelo de estudio para el sistema nervioso¹⁰⁴. Por esta razón, y dado el conocimiento acumulado sobre la estructura de su sistema nervioso, sobre su desarrollo embrionario, su fisiología y su biología en general, también ha sido escogido como organismo modelo para estudiar los efectos del glifosato sobre la biología animal en general. Si tuviéramos que resumir los hallazgos encontrados hasta el momento en una sola palabra ésta sería: espeluznante. La evidencia disponible muestra efectos dramáticos sobre el sistema nervioso, la fisiología y el desarrollo embrionario.

Denise C. Bailey y sus colegas del King College de Bristol (Inglaterra, UK) han estudiado los efectos sobre las mitocondrias de las neuronas de *C. elegans* con la preparación comercial de glifosato TouchDown®. El grupo de trabajo realizó tratamientos a concentraciones a las que se vería expuesto *C. elegans* si estuviera en el suelo de un campo tratado con este preparado. Para los autores "la exposición de *C. elegans* a TouchDown conduce a la inhibición mitocondrial y la producción de peróxido de hidrógeno¹⁰⁵". La producción de moléculas oxidantes, como el H₂O₂, es un claro síntoma a nivel mitocondrial de que la fisiología de un organismo está siendo estresada. En estudios anteriores, el mismo departamento del King College de Bristol con Rekek Negga a la cabeza, utilizó las mismas concentraciones de uso de glifosato TouchDown® para indagar sobre los efectos neuro-

¹⁰⁴ Brenner pensaba que *Drosophila melanogaster* (el organismo modelo por antonomasia en genética) era demasiado grande para hacer un mapeo completo de su sistema nervioso, pero la tarea de conseguir este "diagrama de las conexiones neuronales o conectoma" solamente se logró en *C. elegans* en fechas tan próximas a la actualidad como 2019.

¹⁰⁵ La producción de H₂O₂, o peróxido de hidrógeno, a nivel celular es un indicador de estrés oxidativo. La mayor existencia de moléculas oxidantes (radicales libres) como ésta, produce todo tipo de lesiones celulares que pueden acarrear la acumulación de sustancias tóxicas en la célula, de proteínas mal formadas y, en general, en un peor funcionamiento fisiológico, llegando incluso al daño genómico y a la muerte de la célula.

tóxicos de este preparado encontrando efectivamente resultados positivos. De especial relevancia son las conclusiones de su trabajo:

“Nuestros estudios demuestran que «C. elegans» es vulnerable a los herbicidas que contienen glifosato y a los fungicidas que contienen Mn/Zn-EBDC¹⁰⁶ en concentraciones ambientalmente relevantes, lo que sugiere que estos gusanos son un modelo valioso y viable para futuras pruebas con estos pesticidas. En relación con las concentraciones testeadas en nuestros estudios, es importante señalar (especialmente para los herbicidas en base a glifosato), que ambos agroquímicos se pueden comprar fácilmente en concentraciones mucho más altas que las utilizadas en aplicaciones comunes. Por lo tanto, los humanos (y la fauna local) podrían estar potencialmente expuestos a concentraciones mucho más altas que las reportadas aquí. Si bien las concentraciones en el extremo superior de la curva dosis-respuesta fueron más altas que las concentraciones de aplicación recomendadas, es probable que sigan siendo relevantes en los paradigmas de exposición humana”.

¿Por qué Rekek Negga y sus colegas decidieron investigar los efectos neurotóxicos del glifosato y por qué un trabajo en un nemátodo es tan relevante para los seres humanos como parece desprenderse de las conclusiones de sus experimentos? Todo está en el contexto. Hay ya publicados al menos tres estudios epidemiológicos que relacionan la exposición crónica a pesticidas, con el aumento del riesgo de padecer la enfermedad de Parkinson¹⁰⁷, todo ellos con más de 15 años de antigüedad.

¹⁰⁶ Manganeso/Zinc Etileno-bis-Ditiocarbamato. Un fungicida utilizado para evitar el crecimiento de hongos en semillas, frutas almacenadas y para el tratamiento de los cultivos. También se utiliza como fungicida en fluidos refrigerantes.

¹⁰⁷ A este respecto, hay un trabajo ya clásico de Caroline M. Tanner *et al.* (1999) hecho sobre gemelos en el cual se descarta completamente cualquier componente genético de esta enfermedad, salvo que esta debute antes de los 50 años. Así, como decía Richard Lewontin, “para el darwinismo clásico la historia de la vida no es verdaderamente la historia de las especies, sino la historia del ambiente y de los acontecimientos al azar, de las mutaciones, que permitan a las especies seguir dentro de su propia historia, la historia autónoma de ese ambiente”. En otras palabras, el ambiente es también producto del organismo y éste acaba afectándole tarde o temprano de una u otra manera.

Ascherio *et al.* (2006) afirman que “Las personas expuestas a pesticidas tuvieron una incidencia de la Enfermedad de Parkinson un 70% mayor que las que no estuvieron expuestas”. Dana B. Hancock *et al.* (2008) concluyen que “las personas con enfermedad de Parkinson tenían significativamente más probabilidades de informar sobre la aplicación directa de pesticidas que sus familiares no afectados. La frecuencia, la duración y la exposición acumulada también se asociaron significativamente con el Parkinson en un patrón de dosis-respuesta (...). Al clasificar los pesticidas por tipo funcional, se encontró que tanto los insecticidas como los herbicidas aumentan significativamente el riesgo”. Isabelle Baldi *et al.* (2003) encontraron que en el sur de Francia existía “una asociación positiva con la exposición ocupacional a pesticidas (...) sin embargo, no se encontró una relación clara con la dosis”. Consideran que sus resultados “apoyan la hipótesis de una asociación entre la exposición ocupacional a pesticidas y la Enfermedad de Parkinson y señalan la necesidad de investigar el papel de los fungicidas”.

Pese a estos hechos, hay revisiones recientes que ponen en duda la calidad de estos estudios, poniendo por encima la metodología de otros que no ven relación entre la exposición a glifosato y el desarrollo de la enfermedad de Parkinson, como es el caso del *paper* de Ellen T. Chang *et al.* (2022). Es curioso. El 20 de marzo de 2024 el el Ministerio Federal de Trabajo y Asuntos Sociales (BMAS) alemán reconoció el Parkinson como enfermedad profesional en contextos laborales de uso crónico de pesticidas¹⁰⁸.

Desde luego el principio de precaución debe operar. El trabajo de Negga *et al.* (2011) demostró también que el preparado comercial de glifosato, en combinación, o no, del fungicida, produce en *C. elegans* “una reducción estadísticamente significativa y dependiente de la dosis en el número [de] las neuronas de los gusanos tratados (...). Esta reducción (...) estuvo acompañada por una neurodegeneración (...). Para

¹⁰⁸ Lo han denominado “Síndrome de Parkinson causado por pesticidas” y el informe científico que lo avala está producido por el propio ministerio de trabajo bajo el título en alemán *Wissenschaftliche Empfehlung für die Berufskrankheit “Parkinson-Syndrom durch Pestizide”*. El informe ha sido elaborado por el Comité Médico Asesor en Enfermedades Profesionales del Ministerio.

el tratamiento [con los dos productos, el herbicida y el fungicida se] sugirió interacciones sinérgicas. En conjunto, estos datos sugieren que la degeneración neuronal se produce en C. elegans después del tratamiento con concentraciones ambientalmente relevantes de TouchDown® o el fungicida”.

McVey *et al.* (2016) fueron un poco más allá e indagaron sobre los efectos del preparado comercial TouchDown® sobre el desarrollo embrionario de *C. elegans* y, en concreto, sobre el desarrollo embrionario del sistema nervioso. Encontraron que el número de neuronas cae bajo los efectos del preparado comercial y, en concreto, cae el número de aquellas relacionadas con la secreción de la dopamina. También encontraron aumentos del superóxido (O_2^-)¹⁰⁹. La caída en la funcionalidad de las neuronas dopaminérgicas está estrechamente relacionada con la aparición de las enfermedades como el Parkinson, las Coreas y otras enfermedades de la coordinación neuromotora. Los autores concluyen que:

“la exposición temprana a la TouchDown® puede perjudicar el desarrollo neuronal, tal vez a través de la perturbación del superóxido. Dado que las perturbaciones tóxicas durante el desarrollo pueden hacer que las personas sean más vulnerables a las enfermedades neurodegenerativas en la edad adulta, estos estudios proporcionan algunas de las primeras pruebas en este organismo modelo de que la exposición temprana (...) puede afectar negativamente al sistema nervioso en desarrollo [de seres humanos]”.

¹⁰⁹ El superóxido, como el peróxido de hidrógeno, son moléculas muy oxidantes. Como hemos dicho, su aumento denota estrés celular. Un estrés celular que, como vemos, acaba en este caso con la reducción del número total de células nerviosas en el organismo. La presencia descontrolada de radicales libres nunca es una buena señal para un organismo.

Australia como fábula

La evidencia aquí presentada pone sobre la mesa cuestiones realmente importantes. Estamos hablando de uno de los *Tipping point* cruciales dentro de un ecosistema: el reciclado de la materia orgánica. ¿Qué ocurre cuando un suelo deja de poder reciclar de forma adecuada la materia orgánica que se deposita sobre él? Vamos a verlo con un ejemplo.

Los escarabajos son el grupo animal más diverso del planeta, con unas 300.000 especies descritas. Sus funciones ecológicas son igualmente variadas, pero entre las más importantes está la de ejercer de nexo entre la materia orgánica macroscópica (una fruta, un cadáver, heces, etc.) y la estructura íntima del suelo. Nadeau *et al.* (2015) lo describen así:

“Este taxón representa un componente clave del flujo de energía en muchos ecosistemas porque las especies de coleópteros heterótrofos contribuyen al ciclo de nutrientes y porque son enlaces tróficos importantes en las redes alimentarias”.

En concreto, los escarabajos coprófagos (básicamente la superfamilia Scarabaeidae) son un buen ejemplo de ello. Se pueden dividir en cuatro grupos funcionales en su interacción con el estiércol: I) los telocópridos o rodadores de pelotas (*Ball rollers* o escarabajos peloteros); II) los endocópridos o escarabajos que viven dentro del estiércol; III) los escarabajos que depositan directamente sus huevos sobre el estiércol y serán las larvas que nazcan de ellos las que se alimentan de la materia orgánica; y IV) los denominados cleptocópridos, o ladrones de estiércol, porque utilizan para completar su ciclo vital y/o para su alimentación estiércol elaborado por otras especies.

Que los escarabajos adopten una u otra estrategia, que sean capaces de utilizar estiércol de un tipo de animal, y no de otro, o que las poblaciones existentes sean capaces de gestionar la cantidad de materia orgánica que cae al suelo, va a influir directamente en la productividad de las tierras sobre las que esta materia orgánica y estos escarabajos están.

En Australia, el número de especies nativas de coleópteros coprófagos es de unas 300. Además, las poblaciones son abundantes. Durante

la colonización inglesa de esta enorme isla, se decidió que ésta se especializaría en la producción de ganado y, durante los primeros años del siglo XX, ésta producción se incrementó exponencialmente: enormes cantidades de tierra disponibles para alimentar de forma económica a un ganado que era transportado, posteriormente, a la metrópoli para su consumo y generar, así, enormes ganancias. Sin embargo, la productividad de estos pastos comenzó a descender sin motivo aparente. Las poblaciones de moscas (algunas de ellas transmisoras de enfermedades) y la incidencia de helmintosis¹¹⁰ en el ganado se dispararon. Solamente a partir de la década de 1960 comenzó a hipotetizarse que los escarabajos coprófagos australianos no eran capaces de manejar el estiércol producido por el ganado introducido por los europeos. Así, en la década de 1970, se destruían al año más de 3 millones de hectáreas¹¹¹ de pastos por exceso de materia orgánica de origen vacuno. Simplemente las 300 especies de escarabajos coprófagos de Australia estaban adaptadas a utilizar estiércol de marsupial en ambientes secos, o muy secos, y no sabían qué hacer con el estiércol húmedo que producen las vacas. No se habían cruzado jamás con un bóvido en toda su historia evolutiva.

Es decir, la acumulación de materia orgánica sin degradar en los suelos estaba produciendo una disminución de la productividad de los mismos, además de otros efectos indeseados. El uso de plaguicidas de forma masiva puede producir situaciones similares. Estamos viéndolo en otros ámbitos. La reducción de las poblaciones de polinizadores guiada fundamentalmente por el abuso y abuso de estos productos es un hecho. Ha sido documentada a nivel global por Sánchez-Bayo y Wyckhuys (2021).

¿Qué podría ocurrir con la productividad de nuestros suelos si, además de los coleópteros, se vieran afectados en su función edáfica los anélidos, los nemátodos, los hongos o las bacterias? Todo apunta a que, si el tránsito de materia orgánica hacia sus elementos más básicos

¹¹⁰ Conjunto de daños y enfermedades causadas por gusanos parásitos intestinales del filo Platyhelmintha.

¹¹¹ Para tener una idea real del tamaño de superficie del que hablamos, esto equivale a 30.000 Km². La superficie del País Valenciano es de 23.255 Km²; Equivale al 0,39% de la superficie de Australia.

se detiene, como en el caso australianos, la productividad de los suelos bajará y, con ello, veamos afectaciones importantes en nuestros ecosistemas y en la productividad de los campos de cultivo.

Y, a modo de hipótesis, quizá no ya el uso de pesticidas, sino concretamente el uso masivo de glifosato esté “gripando” la capacidad de reciclaje de materia orgánica de nuestros suelos, contribuyendo a la pérdida de fertilidad de los mismos. Hay suficientes argumentos racionales basados en evidencias sobre los efectos del uso masivo de pesticidas y los descensos de productividad de la tierra. Aquí hemos recolectado unos cuantos argumentos más. ¿Por qué hay tierras con un sistema productivo orgánico y respetuoso con la edafofauna que son capaces de superar en productividad a los sistemas de cultivo tradicionales y biotecnológicos? La hipótesis queda formulada.

Los ecosistemas acuáticos

Ecosistemas acuáticos y biodiversidad

Cada vez hay más evidencias sobre la bioactividad del glifosato sobre los ecosistemas acuáticos. Podemos ver sus efectos en múltiples organismos y a concentraciones que medioambientalmente es frecuentemente detectado. Estamos hablando, por ejemplo, del desarrollo embrionario de anfibios y peces afectado por este herbicida. Hablamos de composición y dinámicas poblacionales del plancton modificadas, alteradas y simplificadas. Hablamos también de la capacidad fotosintética de algas y macrófitos, viéndose especialmente afectada la maquinaria proteica encargada de realizar la fotosíntesis.

A la vez, Denise Breitburg del Centro de Investigación medioambiental del *Smithsonian*, y una gran variedad de colaboradoras y colaboradores de diferentes centros de EE.UU., demostraron en un informe publicado en *Science* en 2018 que los mares del mundo se están “desoxigenizando”. Siendo más claros: la enorme cantidad de pesticidas y fertilizantes con elevados contenidos en fósforo y nitrógeno, están elevando el consumo de oxígeno de las aguas superficiales y profundas de nuestros océanos, poniendo en riesgo todas las cadenas tróficas de los mismos y, por tanto, poniendo en riesgo la capacidad de éstos para nutrir a la humanidad o (mucho más importante) de destruir completamente las funciones ecológicas que tienen (efecto tampón¹¹²,

¹¹² El CO_2 mantiene un equilibrio con el agua de los océanos. Un breve resumen de los procesos implicados sería el que sigue. El océano es capaz de mantener en disolución el CO_2 . Este dióxido de carbono puede quedarse en disolución sin interactuar con las moléculas de agua o puede interactuar con ellas. Cuando éste interactúa con el H_2O , se forma H_2CO_3 (bicarbonato), que a su vez puede disociarse en iones bicarbonato y protones. Si aumenta la concentración de CO_2 en la atmósfera (como lleva ocurriendo desde que empezamos a quemar carbón para la industria británica en el siglo XVIII), el equilibrio químico se desplaza y se formarán más protones e iones bicarbonato, acidificando los mares. Cuando esto empieza a ocurrir (Como ya está ocurriendo) se puede afirmar que la “función tampón” del océano deja de funcionar. Ya no absorbe CO_2 sin que disminuya su pH. También parece que su capacidad de almacenar CO_2 en sí también se ve perjudicada.

efecto amortiguador del clima¹¹³, gran reservorio de biodiversidad¹¹⁴, secuestro de carbono a través de la llamada “bomba biológica¹¹⁵” y producción de oxígeno, entre otras).

¿Qué puede tener que ver el glifosato con el aumento de la tasa de respiración de nuestras aguas oceánicas? En el primer capítulo del texto hemos visto que la molécula de glifosato es, básicamente, la unión de la glicina con un grupo fosfometilo. Al menos en teoría, ese fósforo del grupo metilo podría acabar siendo utilizado por el plancton fotosintético, o por el zooplancton, para crecer, multiplicarse y, en un espacio relativamente corto de tiempo, aumentar el consumo de oxígeno por encima de la tasa de disolución desde el aire¹¹⁶. Esta tesis parece haberse comprobado y, además, con el aumento del uso del glifosato en todo el mundo, ésta fuente de fósforo habría pasado de residual, a una fuente a tener en cuenta en el ciclo biogeoquímico de este elemento esencial para la vida y para la productividad del sistema agroindustrial.

Marie-Pier Hébert *et al.* (2019) han estimado que en EE.UU. se han

113 El agua de los océanos (en general cualquier masa grande de agua) tiene una enorme capacidad de absorber energía sin incrementar su temperatura. Es una propiedad física del agua: el elevado calor específico. Esta propiedad de los océanos también parece que se está viendo limitada actualmente debido a la enorme cantidad de irradiación rebotada por nuestra atmósfera al haber ya doblado su contenido atmosférico en CO₂ con respecto a nivel preindustriales.

114 Según el *Census of Marine Life (COML)* existen aproximadamente un cuarto de millón de especies descritas en nuestros mares y océanos.

115 Los llamados “*blooms*” algales, o sobrecrecimientos del fitoplancton, se producen cuando hay un aporte excepcional de nutrientes a las aguas superficiales. Pese a que el zooplancton supera en 5:1 al fitoplancton en condiciones normales, el crecimiento y productividad algal es de tal calibre en los *blooms* que, en pocos días, esta proporción se invierte y se amplía con creces. Estos “nuevos” componentes del fitoplancton no tienen depredadores dado su elevado número. El zooplancto no da abasto. En términos de CO₂ son un montón de toneladas de carbono capturado que, cuando muera, irán al fondo marino. Si esto ocurre de forma masiva y continua (cosa que ocurre frecuentemente debido a los aportes antrópicos de nitrógeno y fósforo), se crean las llamadas “zonas muertas”: zonas del fondo marino donde la caída de materia orgánica, y su degradación por parte de los organismos allí existentes, consume todo el oxígeno disuelto.

116 El oxígeno disuelto en cualquier masa de agua proviene, o bien de los organismos fotosintéticos acuáticos, o bien de la atmósfera.

multiplicado por 6 los aportes promedio de fósforo derivado del glifosato, pasando de 1,6 Kg/Km² a 9,4 Kg/Km², superándose frecuentemente en áreas plantadas con cultivos resistentes a glifosato los 20 Kg/Km². Para la autoría del trabajo estas cantidades ya son comparables a otras sustancias fuente de fósforo a las cuales ya se les ha aplicado regulaciones precisamente por influir en el ciclo del mismo, como por ejemplo los detergentes. Esto puede ser muy importante en regiones con índices ultravioleta elevados y un elevado número de días de insolación. Algunos trabajos ya señalan un importante papel de este factor en la liberación de fósforo por parte del glifosato¹¹⁷.

Además, por lo que sabemos, los océanos son los responsables de la producción del 50% del oxígeno que respiramos y son capaces de absorber el 26% de las emisiones de CO₂ antropogénicas. Es quizás una hipótesis atrevida pero, dado, el crecimiento del uso del glifosato a nivel mundial y su imbricación con la agroindustria en general (y la producción de piensos en base a soja para la producción de carne en particular), ¿puede este herbicida directa o indirectamente, estar aumentando las probabilidades de desestabilización de las funciones ecológicas de los océanos?

¿La producción primaria en juego? Plancton y glifosato

En el primer capítulo de este texto hemos examinado cómo de ubicua es la presencia del glifosato en todos los ecosistemas. En concreto, vimos que las concentraciones en los ecosistemas acuáticos, tanto terrestres, como marinos costeros, no eran despreciables. La mayor parte de las veces es muy baja, pero siempre detectable y, como veremos, ciertamente muchas veces se detecta a concentraciones medioambientalmente relevantes.

¿Son estas concentraciones capaces de alterar la biodiversidad fitoplanctónica de las aguas? Elise Smedbol y sus colegas de la Universidad de Quebec (Canadá), del *Laboratory of Aquatic Microorganism Ecotoxicology*, han investigado los efectos de bajas concentraciones de

117 Por ejemplo An *et al.* (2023), que además señalan la importancia de las especies reactivas del oxígeno en el proceso de liberación del fósforo.

glifosato sobre comunidades fitoplanctónicas de agua dulce. Probaron un intervalo de concentraciones medioambientalmente relevantes que osciló entre los 1 µg/L y 1000 µg/L. Las comunidades de estudio eran naturales. Fueron tomadas de una zona acuática cerca de la ciudad de Boisbriand, al sureste de Quebec. Los tratamientos se aplicaron a la muestra y se estudió los cambios que se producían con respecto al control. Se pudieron observar cambios específicos desde los 5µg/L (algunas especies mostraron ya sensibilidad diferencial) pero los primeros cambios en los índices de diversidad se observaron a concentraciones entre los 50-100 µg/L, todas ellas concentraciones, como hemos visto, medibles en ríos y lagos. Las exposiciones duraron, solamente, 4 días.

También midieron parámetros fotosintéticos: estudiaron el “rendimiento cuántico efectivo de la fotosíntesis” (concepto que intenta estimar la eficacia de la fotosíntesis¹¹⁸), la “irradiancia mínima de saturación” (la irradiancia es la cantidad de potencia incidente sobre una superficie y, referida a la fotosíntesis, estaríamos hablando de potencia de la radiación solar¹¹⁹), y la “velocidad máxima relativa de transporte

¹¹⁸ La fotosíntesis es proceso activado por la radiación proveniente del sol y, en concreto, por la parte particulada de la misma: los fotones. Este concepto, rendimiento cuántico efectivo, mide el número de veces que se da el transporte de fotones en los fotosistemas (que son los responsables reales de la fotosíntesis) por cada fotón absorbido. Además, para terminar de construir el concepto, se relativiza en función de la cantidad de CO₂ absorbido. Los fotosistemas, por su parte, son un conjunto de proteínas que se interrelacionan entre sí y que son capaces de producir un flujo electrónico a través de sus estructuras y con el que son capaces de crear un gradiente químico. Este gradiente químico, a base de protones (H⁺), es la base de la vida. Nuestras mitocondrias (y las suyas) también lo hacen, pero “quemando” materia orgánica. La “magia” de la fotosíntesis es que los organismos autótrofos con este equipamiento de fotosistemas son capaces de generar este gradiente gracias a los fotones (del sol, vaya). A partir de ahí, son capaces, como nuestras mitocondrias, de almacenar esta “energía química” en una especie de “moneda química”: el Adenosin Trifosfato o ATP. Y con este ATP son capaces de hacer anabolismo y sintetizar toda clase de moléculas.

¹¹⁹ A su vez, al hablar de irradiancia mínima de saturación, hablamos de la potencia mínima a partir de la cual el proceso fotosintético no produce más fotosintatos. En otras palabras: estiman la irradiancia a la cual la planta alcanza su máxima producción de materia orgánica para construir el organismo.

de electrones” (un parámetro que mide la velocidad del flujo de los electrones a través del sistema proteico que poseen los organismos fotosintéticos). Pues bien, según los autores:

“El rendimiento cuántico efectivo se redujo significativamente a concentraciones de glifosato de 500 µg/L y 1000 µg/L (...). La irradiancia mínima de saturación se redujo a varias concentraciones: 5, 10, 100 y 1000 µg/L. La velocidad máxima relativa de transporte de electrones fue el parámetro más sensible y se redujo significativamente en todas las concentraciones de glifosato (excepto para 50 µg/L)”.

Los autores también midieron los efectos del glifosato a nivel comunitario, observando qué ocurre con la concentración total de los pigmentos fotosintéticos y protectores y algunos marcadores de estrés oxidativo. En los organismos fotosintéticos encontramos, básicamente, dos tipos de clorofilas, *clorofila a* y *clorofila b*, y *carotenoides* de diversos tipos. La *clorofila a* está asociada a los fotosistemas de la cadena de transporte electrónico que hace posible la fotosíntesis. La *clorofila b* tiene un espectro de absorción parcialmente complementario a la *clorofila a*. Resumiéndolo mucho, los carotenoides y la *clorofila b* captan y ceden la energía que absorben a la *clorofila a* y ésta se transforma en poder reductor (gradiente químico) que, a su vez, se usa para producir moléculas orgánicas. El núcleo, por tanto, del sistema pigmentario, parece ser la *clorofila a*¹²⁰. ¿Qué datos obtuvieron Elise Smedbol y sus colegas?:

“El contenido de clorofila a y carotenoides (medido como porcentaje de pigmento en comparación con el control) disminuyó significativamente en las células de fitoplancton para todas las concentraciones de glifosato, mientras que no hubo una diferencia significativa para el contenido de clorofila b. La relación entre ambos tipos de clorofila (a/b) disminuyó con las concentraciones crecientes de glifosato”.

Es decir, en términos generales, toda la comunidad vio dificultada su capacidad de fotosintetizar a través de la reducción del número de especies (caída de los índices de biodiversidad) y de la capacidad

¹²⁰ Se puede consultar mucha información al respecto en cualquier manual de Biología molecular. Por ejemplo, Lodish (2008).

fotosintética (caída de la cantidad de pigmentos fotosintéticos). Por su parte, los marcadores de estrés oxidativo solo aumentaban en las dosis más altas.

En otro experimento multiespecífico, Wang y sus colegas del laboratorio estatal clave de ciencia medioambiental marina de la Universidad de Xiamen (China) estudiaron cómo afectaban concentraciones de glifosato relativamente altas (6,1 mg/L y 61 mg/L) a 14 especies de fitoplancton marino costero. Así, los autores consideran probada “la inhibición significativa del crecimiento bajo ambas concentraciones de glifosato en seis de las especies examinadas en este estudio. Mientras que el glifosato a 360 µM [61 mg/L] exhibió una inhibición del crecimiento casi completa en todas las especies”. Este estudio es importante porque las 14 especies utilizadas poseen simbiosis bacterianas y muy probablemente, asegura el equipo investigador, el daño sobre las bacterias vehiculiza la destrucción de la biología de estas especies.

Vamos a seguir profundizando sobre los efectos poblacionales del glifosato sobre el plancton. Vendrell *et al.* (2009). Este grupo de investigación de la Universidad de València (España) encontró una reducción general del 10% de la tasa de crecimiento del fitoplancton a concentraciones bastante elevadas de glifosato (1,6-3 mg/L). Si vamos a especies concretas, en *Scenedesmu acutus* la caída del crecimiento es del 17,9% tras aplicarse un tratamiento mucho menor 100 µg/L. Los datos no son tan drásticos para *Scenedesmu subspicatus* con una caída del 9,3% a una concentración de 390 µg/L. Por su parte una especie clásica de cualquier columna de agua dulce, *Chlorella vulgaris*, presenta reducciones del 7,1% y el 16,4% a 100 µg/L y 390 µg/L respectivamente. Una especie hermana, *C. saccharophila*, por su parte, no parece sensible al glifosato a ninguna de las concentraciones probadas. Las concentraciones a las cuales se muestra bioactividad del glifosato son mucho menores que en otros trabajos.

Este tipo de trabajos nos está indicando que hay una gran diversidad de sensibilidades al herbicida, desde especies que quizá no sean especialmente dañadas por él, hasta especies muy sensibles. En este sentido, son útiles los trabajos que buscan dilucidar el mecanismo de acción del glifosato sobre el fitoplancton. Ya hemos visto el trabajo de

Smedbol *et al.* (2018) como ejemplo de ello. Otro buen trabajo es el realizado por Cruz de Carvalho, y otras diez personas en su mayoría del MARE (Centro de Ciências do Mar e do Ambiente) de Lisboa (Portugal). Aquí se tomó como modelo de estudio una diatomea ampliamente distribuida por los océanos del planeta y que, incluso, tiene diferentes cepas, algunas de ellas adaptadas a la vida en aguas cálidas tropicales: *Phaeodactylum tricornutum*. El objetivo del trabajo era ver cómo reaccionaba la bioquímica celular de la diatomea y, para ello, observaron qué ocurría con el perfil de ácidos grasos de la célula tras la exposición, qué ocurría con el flujo electrónico en los cloroplastos y, ya centrándose en parámetros observables a nivel de población (nivel macro), midieron el crecimiento poblacional del cultivo. El rango de concentraciones a las que se expuso a *P. tricornutum* fue de 0-1000 µg/L. La tasa de crecimiento del cultivo disminuyó a partir de la concentración 50 µg/L y la inhibición total del crecimiento ocurrió a partir de los 250 µg/L. Esto son concentraciones relativamente bajas. A esas mismas concentraciones ocurría un incremento de la degradación metabólica de algunos ácidos grasos¹²¹, además de producirse una gran reducción del flujo electrónico en los cloroplastos. Esta parece ser la causa próxima de la reducción y/o inhibición de las tasas de crecimiento.

Hay, además, otro tipo de experimentos que busca escapar del “empirismo tradicional” y buscar implicaciones en las comunidades biológicas más allá de los efectos sobre una única especie. Un ejemplo son los experimentos de mesocosmos¹²². Hay varios trabajos con esta metodología que analizan lo que ocurre cuando el fitoplancton y el

121 Ocurrió un incremento en la proporción celular de ácidos grasos α -linoléico y eicosapentaenoico (EPA), involucrados ambos en reacciones bioquímicas esenciales.

122 Los experimentos de mesocosmos son una herramienta experimental pensada para intentar acortar la distancia epistemológica que existe entre un experimento donde se controlan todas las variables excepto la que queremos ver cómo varía (un experimento tradicional) y la enorme cantidad de interdependencias existentes en los ecosistemas reales. En el mesocosmos se intenta reproducir una comunidad natural. En muchas ocasiones, de hecho, se toman comunidades naturales del propio medio y son estudiadas en condiciones controladas. En este caso, por ejemplo, el fitoplancton crece en tanques de varios miles de litros donde la alimentación está controlada.

picofitoplancton¹²³ son sometidos a concentraciones subletales de Roundup® y cuando se repite la exposición a concentraciones elevadas. Leanne F. Baker *et al.* (2016) estudian lo que ocurre cuando el *spraying* vertido por explotaciones agrícolas cercanas cae sobre lagunas poco profundas cercanas. Aparentemente no encontraron efectos agudos sobre el fitoplancton y el zooplancton tras la contaminación de las lagunas. Sin embargo, volvieron 5 meses después y el cambio era radical: el fitoplancton había variado su composición específica, sin incrementar su abundancia, mientras que el zooplancton había disparado su abundancia específica y numérica. Carmen Alejandra Sabio y García y colaboradores (2020) observaron que concentraciones por debajo de las de aplicación (4 mg/L) podían hacer descender hasta un 85% la abundancia del picoplancton y, en un porcentaje parecido, su diversidad específica. Naíla Barbosa da Costa *et al.* (2022) observaron que, tras un “tratamiento” de 300 µg/L, ocurrían dos cosas en la mayor parte de especies del picofitoplancton: I) se reducía la diversidad específica, produciéndose una “selección natural” hacia especies más resistentes al glifosato (como las cianobacterias), II) se producía una aclimatación individual de algunas células y una selección intraespecífica hacia individuos más tolerantes al glifosato y, III) se producía una potente selección por genes resistentes a antibióticos.

Esta tercera conclusión del trabajo de Barbosa da Costa es la más inquietante de todas. La OMS reconoce que el incremento a la resistencia a los antibióticos por parte de las bacterias supone un problema de primera magnitud: *“un creciente número de infecciones, como la neumonía, la tuberculosis, la septicemia, la gonorrea o las enfermedades de transmisión alimentaria, son cada vez más difíciles —y a veces imposibles— de tratar, a medida que los antibióticos van perdiendo eficacia.”* El mayor uso de antibióticos no se produce en nuestros propios cuerpos para el tratamiento de enfermedades infecciosas de origen bacteriano,

¹²³ El prefijo “pico-” indica la bilionésima parte de la unidad de medida escogida. En este caso se refiere a longitud, por tanto, metros. El tamaño promedio de una célula eucariota se situaría alrededor de lo 2 µm, o lo que es lo mismo, 2000000 picómetros. Así que cuando hablamos de picofitoplancton estamos hablando de células procariotas fotosintéticos (bacterias).

sino que es veterinario y la aparición de resistencias a antibióticos está claramente relacionada con la autorización para uso en las explotaciones ganaderas de un determinado antibiótico (Aarestrup, 2005). Esto es debido a que las bacterias se guardan un pequeño as en la manga tras su muerte: los restos del cadáver, por efecto de la lisis celular, vierte al medio todo el contenido de la célula, incluyendo metabolitos, ribosomas y ADN. Las bacterias que todavía viven son capaces de reclutar este ácido desoxiribunocleico. Hay un conjunto de procesos fisiológicos bastante complejos que permite a la célula procariota capturarlo y usarlo como mejor le parezca. Normalmente lo que capturan son fragmentos circulares de ADN conocidos como plásmidos (aunque no solo) y suelen contener información genética necesaria para la resistencia a antibióticos. Este conjunto de procesos fisiológicos que prepara para la captación de plásmidos se denomina *capacitación*. Y esto es lo que parece que está ocurriendo tras la aplicación de concentraciones de 300 µg/L de Roundup®. También hay un pequeño reclutamiento de fragmentos de ADN que involucran la síntesis de “mejores versiones” de la EPSE sintetasa, pero lo que parece incrementar la supervivencia de este picofitoplancton es la adquisición del medio de genes de resistencia a antibióticos. La vía por la cual los genes de resistencia a antibióticos estarían otorgando resistencia al herbicida todavía se desconoce.

Ahora imaginemos una explotación ganadera cerca de inmensos campos de cultivo donde se utiliza glifosato a concentraciones recomendadas por el fabricante. Es una bomba de relojería. De hecho, esto suele ser así: las granjas y macrogranjas suelen situarse en zonas rurales donde la superficie dedicada al cultivo es mayoritaria. Y en cada una de esas granjas puede estar ocurriendo lo que en biología evolutiva se denomina *Evolutionary rescue* o “rescate evolutivo”. La bioactividad de un compuesto, en este caso el preparado comercial en base a glifosato Roundup®, produce la muerte de algunas bacterias que, ya sea por la adquisición de estos plásmidos con genes de resistencia a antibióticos, ya sea por aclimatación metabólica, pueden resistir una segunda aplicación del compuesto bioactivo a concentraciones superiores. En otras palabras, una sustancia (o cualquier cosa) que en un principio, y bajo la naturaleza dada de un determinado organismo, causaría la

muerte del mismo, un proceso biológico no esperado (en este caso el reclutamiento de plásmidos) consigue darle una oportunidad de supervivencia. Es lo que también han demostrado Fugère *et al.* (2018) en otro trabajo de mesocosmos.

Este efecto ocurre muy frecuentemente en bacterias y, además, es un ejemplo de la potencia de la cooperación en la evolución. Existen algunas especies¹²⁴ muy resistentes a sustancias bioactivas que, al crecer y rodear algunas células de otras especies más sensibles, las protegen de la exposición al tóxico y las permiten también crecer. Hay un trabajo precioso de Sorg *et al.* (2016) en el que muestran un vídeo donde la bacteria sensible permanece estable con una población de cuatro células, mientras la población resistente al tóxico del medio crece exponencialmente hasta que las células de esta especie rodean a las sensibles. En ese momento se produce también la explosión poblacional de la especie sensible.

Tanto la capacitación, como el rescate evolutivo o la cooperación ante los antibióticos puede empezar a ocurrir a concentraciones muy bajas del tóxico. Son un “win-win” bacteriano, pero una ganancia cooperativa que facilita la transmisión a través de múltiples especies bacterianas de los genes de resistencia antimicrobiana. La próxima bacteria multiresistente a antibióticos no se está produciendo en un hospital, sino en una macrogranja¹²⁵.

¹²⁴ Hablar de especie bacteriana es un tanto atrevido. La gran Lynn Margulis siempre defendió que no tiene sentido el llamado concepto biológico de especie aplicado a bacterias porque, virtualmente, se produce intercambio genético entre todas las células bacterianas existentes en el planeta. En lugar de especies, se pueden distinguir “formas metabólicas” en lugar y momento determinados. La facilidad para intercambiar, no solamente genes de resistencia a antibióticos, sino genes para sintetizar cualquier proteína, hace que si aparecen cepas resistentes al glifosato, al uranio o capaces de degradar el plástico, ya hay una presión de selección fuerte para ello, la maquinaria metabólica necesaria para resistir estos bioactivos puede transferirse de célula a célula.

¹²⁵ Van Boeckel *et al.* (2016) en *Science* afirman que “en términos relativos, los humanos y los animales consumen cantidades comparables de antimicrobianos (...), pero dado que la biomasa de los animales destinados a comida supera con creces la biomasa de los humanos, las emergencia de nuevas mutaciones que confieran resistencia [a las bacterias] son más probables [en estos últimos].”

Distribución y efectos del glifosato en la columna de agua

La columna de agua es un hábitad muy particular. Quizá muchas personas piensen que los mares, los océanos, los cursos de agua o los lagos sean masas de agua relativamente homogéneas. Nada más lejos de la realidad. Las masas de agua son en sí mismas un contenedor de diferentes ecosistemas con una enorme diversidad de condiciones medioambientales, que tienen su correlato en una enorme diferencia en la flora y fauna que los habita.

Vamos a intentar brevemente desgranar alguno de los mecanismos que están detrás de esta diversidad ecológica en las masas de agua para poder comprender cómo los factores abióticos (y la propia biota) van a distribuirse y compartimentalizarse a lo largo de la columna de agua y, así, también entender los posibles efectos de los pesticidas en estos ecosistemas. A modo de modelo, vamos a resumir lo que ocurre en la mayor parte de masas de agua de climas templados. A continuación se presenta una versión idealizada de lo que ocurre en un clima templado.

Estamos en invierno. Las temperaturas son bajas o muy bajas y, en ocasiones, baja por debajo de cero. No llueve demasiado porque el otoño tempestuoso y ventoso ya pasó. Las aguas suelen estar calmadas y, por tanto, entra en juego la termodinámica: dos cuerpos en contacto a diferente temperatura tenderán hacia un equilibrio térmico entre ambas temperaturas. Las masas de agua en climas templados, en invierno, tienen su superficie fría. En ocasiones (sobre todo si la masa de agua es continental y no demasiado grande), la superficie se congela. El fondo, en algunas ocasiones, está un poco más cálido que la superficie pero en términos generales podemos decir que la situación es de relativa homogeneidad térmica y de salinidad. Sin embargo, conforme avanza la primavera ocurren dos cosas: I) hay más días de sol, más horas de sol y, por tanto, la superficie de la masa de agua se calienta; II) la inestabilidad atmosférica produce mezcla de agua en la superficie. Por tanto lo que vamos viendo es que la superficie se transforma en un ecosistema mucho más inestable (cambios de temperatura y de salinidad; avenidas de nutrientes; lluvia, etc.). Y en términos de promedio la temperatura

va subiendo. Por su parte, si el fondo está lo suficientemente lejos de la superficie, éste permanece impertérrito a lo que allí ocurre. En los mares y océanos esta distancia es aproximadamente de entre 25 y 40 metros, dependiendo de las turbulencias atmosféricas, mientras que en los lagos y lagunas todo es más incierto. Lo importante aquí es que se han generado dos compartimentos ecológicamente diferenciados. Esta compartimentalización va a más conforme avanza el verano: más temperatura, más estabilidad atmosférica (y por tanto menor remoción de las aguas), etc. Se establece una termoclina que separa en términos físicos esta superficie de la masa de agua y su fondo. Una mayor temperatura implica una menor densidad de ese fluido y la densidad es una de esas variables físicas esenciales para los organismos que viven en el agua. Casi todo gira en torno a la densidad: la mayor parte de estos organismos posee mecanismos para regular su densidad corporal y todo el mundo intenta mantener su densidad corporal estable para no hundirse o flotar demasiado. Es por ello que el establecimiento de “clinas” en las masas de agua actúa como fronteras. Es importante también distinguir esta termoclina estacional¹²⁶, que aparece en esta sección más externa de la masa de agua (primeros metros en un lago y esos 25-40 metros en mares y océanos) de la termoclina permanente que tienen todas las grandes masas de agua y que está mostrándonos los diferentes orígenes de las aguas profundas y las aguas más superficiales de los océanos¹²⁷.

126 “Su importancia para los procesos biológicos es enorme. La presencia de un fuerte gradiente de temperatura (de más de 10°C) en pocos metros de la columna de agua e inmediatamente por debajo de la capa superficial mezclada da asimismo lugar a fuertes incrementos de densidad (picnoclina) que, en definitiva, constituyen una barrera para la difusión de nutrientes y para los movimientos verticales del plancton” (Cognetti *et al.*, 2001, p. 43).

127 Las profundidades de todos los océanos del mundo están formadas por aguas frías y de elevada salinidad que se forman en los mares ártico y antártico. Debido a esta baja temperatura y elevada salinidad (la formación del casquete polar en invierno elimina agua de los mares e incrementa la concentración de sal en los mismos: la sal no forma parte de los cristales de hielo) este agua se hunde. La profundidad de los océanos del hemisferio sur están llenos de “agua antártica profunda” y su equivalente de “agua ártica profunda” rellena los del hemisferio norte. Como detalle, el “agua antártica profunda” también llena los del hemisferio norte y, como es más fría y más densa que su equivalente nortea, la podemos detectar por debajo de ella hasta, incluso una latitud tan septentrional como los 40 grados norte.

Además de las termoclinas, también separa esta superficie acuática de la profundidad las llamadas haloclinas y las picnoclinas. Las aguas muy superficiales disminuyen su densidad rápidamente al estar fuertemente calentadas por el sol y, también, al contrario. Cuanto más fría es, más densa se vuelve. Además, incrementa su contenido en sales por la congelación del hielo (si la hubiere), que expulsa las sales de su estructura cristalina¹²⁸. Esto también produce barreras físicas para el movimiento de los seres vivos en las masas de agua. Por último es obvio que la luz del sol no es capaz de penetrar toda la columna de agua en la columna de agua. Además, el descenso de la cantidad de fotones no es lineal, sino que ocurre sobretodo en el primer centenar de metros. Esto establece un claro límite para los organismos¹²⁹.

Ya hemos desgranado el trabajo Hébert *et al.* (2019) y hemos visto que los incrementos en los aportes de fósforo en los cursos fluviales debidos al uso de glifosato y su potencial impacto en las desembocaduras y estuarios. A esos datos debemos agregar este análisis de compartimentalización de los recursos.

Huntscha *et al.* (2018) han demostrado que, al igual que el nitrógeno, el fósforo o el azufre, el glifosato, sigue un ciclo anual de concentración en las aguas determinado por las diferentes “clinas”. La concentración de éste y del AMPA osciló en diferentes lagos suizos entre 15 ng/L en marzo y 145 ng/L en julio, para el glifosato, y 14 ng/L en marzo y 100 ng/L en julio, para el AMPA, siguiendo el gradiente habitual que se forma con la profundidad debido a la formación de la termoclina: una mayor concentración en la superficie, con un rápido descenso de la concentración alrededor de la termoclina. También esta investigación consiguió demostrar que el glifosato puede ser utilizado como fuente de fósforo por el plancton “suizo”, con las consecuencias en las comunidades planctónicas ya descritas: el glifosato está contribuyendo a eutrofizar las masas de aguas continentales.

128 Este fenómeno del incremento de la salinidad en aguas frías permite que, dado que el agua con elevado contenido salino tiene un punto de congelación menor (por debajo de cero), las aguas árticas y antárticas puedan situarse a -1°C o -2°C.

129 Para una revisión del asunto se puede consultar Cognetti *et al.* (2001), en especial de la página 37 a la 113.

Veronique Rosset *et al.* (2014) consideran que es mucho más importante el efecto disruptor sobre la bioquímica de las diferentes especies planctónicas de las pequeñas masas de agua que los efectos de la eutrofización. Y no solamente el fitoplancton ve afectada su composición específica. Ya hemos citado algunos trabajos que demuestran, a elevadas concentraciones eso sí, efectos poblacionales sobre el zooplancton. Sin embargo, Reno *et al.* (2018) han demostrado estadísticamente (a través de modelos teóricos) que las poblaciones naturales de los cladóceros *Daphnia magna* y *Ceriodaphnia dubia* no podrían soportar el contacto con concentraciones de glifosato en el agua, de entre 250 y 3500 µg/L, debido a los efectos deletéreos sobre los diferentes parámetros poblacionales, como la mortalidad, comportamiento depredador, fertilidad, etc. Estas concentraciones ya no son tan elevadas y, de hecho, son relativamente frecuentes en masas de agua terrestres.

Y de la columna de agua, al fondo. Hay muchos organismos que viven en la columna de agua pero que su estrategia de supervivencia consiste en sembrar el fondo de las lagunas con huevos resistentes a la sequía para que, en caso de que la laguna se deseeque, cuando las condiciones vuelvan a ser adecuadas reanuden su desarrollo y eclosionen para repoblar esa nueva masa de agua recién formada. Es el caso del filo de los rotíferos. María Florencia Gutiérrez, del Instituto Nacional de Limnología de Argentina, y sus colaboradores, estudiaron los efectos del glifosato sobre el desarrollo de estos huevos de rotífero y la influencia de los efectos en la composición poblacional y en la biodiversidad. Observaron que la diversidad de especies disminuyó significativamente a concentraciones por encima de 2.7 mg/L. Concentraciones elevadas pero posibles, sobre todo en escorrentías de aguas que han pasado por campos recientemente tratados con glifosato. Además, recordemos que estas aguas de escorrentía, por un lado, penetran en el terreno y van a contaminar las aguas subterráneas y, por otro, suele acabar en masas de agua de pequeño tamaño que suelen desecarse (lagunas temporales). El tiempo de la primera eclosión, el momento de la eclosión máxima (pico de “nacimientos”) y la

frecuencia de las eclosiones (por unidad de tiempo) de la mayoría de las especies de zooplancton también se vieron modificadas por el “tratamiento” de glifosato según Gutiérrez *et al.* (2017). Es decir, cerca de los campos de cultivo tratados con glifosato, la biodiversidad del zooplancton de las lagunas temporales se ve afectada.

Hemos ya observado cómo la bioactividad del glifosato cambia comunidades planctónicas y cómo puede distribuirse en la columna de agua. ¿Estará también afectando a otros organismos de la columna de agua? En lo que queda de apartado vamos a ver algunos ejemplos de lo que ocurre con peces de agua dulce, mientras que dejaremos un análisis más detallado de la evidencia disponible sobre los efectos del glifosato sobre organismos marinos no estudiados todavía para el siguiente punto del texto.

Si en genética el animal fetiche para la experimentación es la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) y en investigación biomédica es el rata (*Rattus rattus*), en fisiología animal se ha utilizado tradicionalmente el llamado pez cebra (*Danio rerio*) como organismo modelo. Zhang y sus colegas del laboratorio de bioquímica médica de la Facultad de Ciencias de la Vida de la Universidad de Nankai (China) utilizaron este pezecillo para estudiar los efectos del herbicida glifosato¹³⁰ sobre el desarrollo embrionario, sobre la actividad locomotora de las larvas y sobre el tejido neural en formación en el embrión del pez. Estos investigadores detectaron que, a concentraciones de 1 mg/L se producía una ralentización del desarrollo, viéndose interrumpido si la concentración es superior. Solamente a concentraciones muy elevadas se ven afectados morfológicamente órganos como el ojo, regiones corporales como la cabeza o la propia longitud y tamaño corporales. Sin embargo, los estudios comportamentales y de daño neuronal, detectaron que se producían efectos a concentraciones de tan solo 10 µg/L. Observaron que las ramas neurales de axones caudales primarios¹³¹ eran claramente aberrantes a esas dosis tan bajas. Y los periodos de actividad/reposo y

¹³⁰ Usaron glifosato como principio activo, sin los aditivos como el POEA que se añaden en los preparados comerciales.

¹³¹ Son las ramas nerviosas que emergen de la espina dorsal y enervan, entre otras estructuras, los músculos laterales de los peces.

otros comportamientos vieron también afectadas sus frecuencias con respecto a los controles.

Nicole M. Roy y sus colegas del Departamento de biología de la Universidad sagrado corazón (Fairfield, EE.UU) también trabajaron con embriones de pez cebra. En concreto, estudiaron los efectos de bajas concentraciones del herbicida sobre el desarrollo embrionario del corazón del pez. A una concentración tan baja como 50 nM/L, presente en muchos ambientes acuáticos, y una exposición de 48h, se observó que el corazón de los embriones latía más lentamente en aquellos tratados con glifosato, que aumentaba la incidencia del *situs inversus* (condición por la cual la mayor parte de las vísceras de un organismo están invertidas con respecto a la disposición habitual; en este caso, el corazón invertía su posición) y de las anomalías estructurales de la aurícula y del ventrículo. Todos estos síntomas anatomopatológicos iban acompañados de expresiones anómalas de receptores de membrana típicos en las células que van a convertirse en células cardíacas.

Por su parte Ming-Hui Li y su equipo del centro de metabolismo molecular, de la escuela de ingeniería biológica y medioambiental de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Nanjing (China) investigaron otros daños tisulares provocados por el glifosato en otra especie de pez: la carpa dorada (*Carassius auratus*). Analizaron la sangre y los tejidos de adultos de esta especie sometidos a 90 días de tratamiento a una concentración muy elevada (33,61 mg/L). La exposición a semejante concentración produjo todo tipo de efectos sobre los peces: índices bioquímicos completamente fuera de lo normal, lesiones tisulares en los riñones, estrés oxidativo en los tejidos, daños evidentes en el metabolismo energético y en el metabolismo de aminoácidos y nucleósidos y daños visibles a nivel tisular en cerebro e hígado.

Ayoola (2008), del Departamento de ciencias marinas de la Universidad de los Lagos (Nigeria), ha estudiado los efectos del glifosato sobre la Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Ha determinado que, para este cíclido, la concentración a la cual muere el 50% de los individuos en una población sometida a un tratamiento de 96h con glifosato es de 1,05 mg/L. Se observaron daños tisulares en las branquias (que incluyen efectos tisulares compatibles con la inflamación), en el hígado

(esteatosis hepática, o hígado graso, y necrosis), en los riñones y en el cerebro (degeneración neuronal generalizada). Todo ello se manifestó externamente con un incremento de la frecuencia respiratoria (estrés respiratorio), natación errática y muerte.

También es cierto que parece haber una gran variabilidad en cuanto a la resistencia al glifosato en peces. Por ejemplo Vivian do Carmo Langiano y Cláudia B. R. Martínez, del departamento de ciencias fisiológicas de la Universidad Estatal de Londrina (Brasil), encontraron que la concentración a la que muere el 50% de los individuos, en este caso del pez tropical *Prochilodus lineatus*, o sábalo, era de 13,69 mg/L a las 96h de exposición. Esta diversidad quizá debería centrar la atención en aquellos organismos más sensibles al glifosato: las bacterias. Es conocido que algunas familias de peces, como los apogónidos, forman simbiosis con bacterias para, por ejemplo, poseer bioluminiscencia que les permite la caza o la atracción sexual. Así que, al menos como conjetura útil, es de suponer que si esta relación biológica entre bacterias y pez es importante evolutiva y ecológicamente, la especie sea más sensible al efecto del glifosato.

¿Qué podemos concluir de estos trabajos aquí citados?

"Los resultados de los estudios que se han resumido en esta revisión indican que el glifosato, como compuesto individual o como componente de productos comerciales utilizados en la agricultura, y su principal metabolito, el AMPA, pueden tener efectos adversos sobre los organismos de agua dulce y los organismos marinos en diferentes niveles (...) El glifosato causó principalmente estrés oxidativo y afectó a las enzimas antioxidantes, a los parámetros sanguíneos y causó varios cambios histopatológicos en las branquias, el hígado y los riñones, (...), genotoxicidad, inmunotoxicidad y cardiotoxicidad en peces y estrés oxidativo, enzimas antioxidantes y parámetros de hemocitos en mejillones. (...) con el AMPA existen muchas lagunas en la literatura científica con respecto al conocimiento de su toxicidad en los organismos acuáticos. El AMPA [por lo que sabemos] puede causar genotoxicidad e inmunotoxicidad en peces, cambios adversos en los parámetros de la hemolinfa, efectos en las enzimas antioxidantes de los mejillones y

retraso en el desarrollo y la supervivencia de los renacuajos. También existen preocupaciones sobre los posibles efectos de bioconcentración y reproducción en organismos de estos compuestos”.

Así concluye la revisión realizada por Nikola Tresnakova *et al.* (2021) en la cual, además, se recogen muchos de los estudios aquí repasados y otros muchos en los cuales podemos abundar en lo que ya es una evidencia con poso: el glifosato es capaz de distorsionar los ecosistemas acuáticos. Tanto la escorrentía (*runoff*), como la capacidad del herbicida para permanecer en plantas, animales y suelos, hacen que la cantidad de glifosato que llegue a un determinado curso o masa de agua sea potencialmente mayor de la que en una temporada de cultivo se vierte sobre los campos. La dinámica del herbicida así lo indica (figura 4).

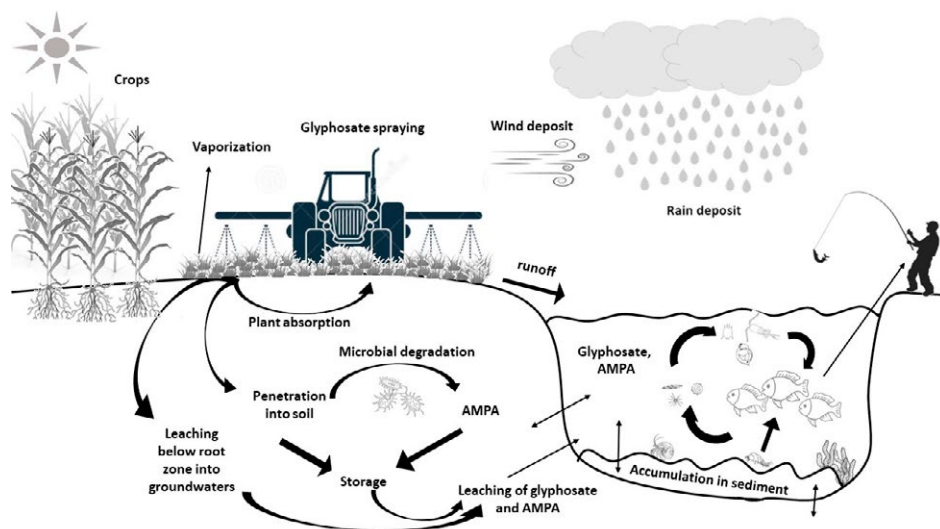


Figura 4: Dinámica del glifosato y su principal metabolito, el AMPA, en la interfaz medio terrestre y medio acuático. Infografía realizada por Tresnakova *et al.* (2021) y realizada bajo licencia Creative Commons (BY)

EXCURSO 2: ¿El glifosato cómo disruptor endocrino?

Hay un argumento recurrente en toxicología ambiental que busca, a través de la especificidad biológica inherente a cada especie, establecer una dicotomía entre organismos importantes y organismos despreciables. Se construyen una especie de relatos basados en solamente una parte de la evidencia disponible que actúan a modo de escudos protectores. Por ejemplo, cuando se acumulan los estudios que demuestran que el glifosato actúa sobre bacterias e invertebrados de forma deletérea, surge el relato que asegura que evidentemente esto es así, que si deseamos progreso “alguien” debe salir perdiendo y que, por supuestos, la biología de los invertebrados y las bacterias no tiene nada que ver con la de los vertebrados. No tenemos porqué preocuparnos. No hay nada que ver en este gusano muerto. Circulen.

¿La biología de invertebrados y vertebrados es diferente? Claro que sí. Pero es el típico aserto que desvía el foco del asunto importante. No es lo que nos diferencia lo que es importante. Cada especie biológica se adapta como puede al medio que habita. Con sus “parientes cercanos” (mismo género o misma familia) comparte más cosas que con aquellos “parientes lejanos”. Esto es de perogrullo. Sin embargo la selección natural no ese *Deus ex machina* que puede inventarse cualquier cosa para que funcione de forma óptima. Trabaja con el material biológico que la historia evolutiva le proporciona. Por eso, cuando aparecen innovaciones evolutivas relativamente eficientes y que hacen su trabajo, suelen quedarse en el tronco evolutivo y cambiarse más bien poco. Ejemplos de esto: los enzimas encargados de las síntesis de andrógenos y estrógenos en las células animales suelen ser similares, ya sea ésta un caracol o un ser humano.

Este es el caso del citocromo P450. En realidad ésta es una familia de proteínas. La que nos interesa en este caso (veremos otras más adelante) tiene el complicado nombre de CYP4501B1 que no es más que la abreviatura del “citocromo 450 1B1”. Las diferentes proteínas de la familia suelen trabajar juntas en la síntesis de colesterol, esteroides y otros lípidos de importancia para la regulación hormonal. En concreto, este citocromo 450 1B1 está encargado de metabolizar el estradiol y una gran variedad de hidrocarburos aromáticos de importancia toxicológica.

Resulta que los moluscos tienen una proteína muy similar a este citocromo y que se encarga a nivel fisiológico de las mismas “operaciones químicas”. Omran & Salama (2013) trabajaron sobre la especie de planorbis *Biomphalaria alexandrina*, un caracol de agua dulce oriundo de Egipto y de cierta importancia médica¹³². Estos caracoles habitan frecuentemente los canales de riego y, por tanto, tiene sentido ver si la aplicación de concentraciones de glifosato utilizadas en el campo puede afectar su fisiología.

Partieron del preparado comercial Herfosate® (con 480g/L de principio activo) y prepararon soluciones de 4,2 mg/L (que habían calculado como la dosis a la que se muere el 10% de los individuos) con las que expusieron durante 3 semanas a los caracoles. El resultado fue una caída estadísticamente significativa del 21,5% en la cantidad total de testosterona gonadal y del 47,3% del estradiol gonadal. Además, se observó también una reducción significativa en la cantidad total de proteínas en las gónadas (del orden del 15%) y un incremento de más del 50% en la inmunoreactividad del citocromo P450 1B1. Este último lo que nos está indicando es que, de alguna manera que no conocemos aún, el glifosato ha estimulado el gen responsable de la síntesis del citocromo y ha resultado en una elevación significativa de la concentración celular de dicho enzima.

Esta es una de las primeras pruebas que poseemos de la actividad xenostrogénica del glifosato. También de la Atrazina (otro herbicida de uso habitual) que también fue estudiado por los autores. ¿Qué argumento de peso puede hacer pensar a cualquier decisor de políticas públicas que éste tipo de evidencias no abren la puerta al principio de precaución? ¿Cuál es la diferencia entre el metabolismo hormonal de un caracol y de un mamífero, en términos cualitativos, que haga pensar que un disruptor endocrino en moluscos no va a afectar a seres humanos?

¹³² Sirve de huésped intermediario para el *Schistosoma mansoni*, un nemátodo que causa una de las formas de esquistosomiasis y que es responsable de un elevado número de incapacidades en los países que la padecen endémicamente.

Ecosistemas marinos

Los organismos marinos han tenido un enorme protagonismo en el avance del conocimiento biológico y evolutivo que actualmente tenemos. Muchos de los experimentos clásicos, que supusieron auténticas revoluciones conceptuales e interpretativas en la biología del desarrollo, se realizaron en organismos marinos. Curt Herbst, a lo largo del siglo XIX, experimentaría con embriones de erizo de mar para indagar en lo que denominó “Auslösung” o inducción permisiva¹³³. Básicamente pensaba que los tejidos en desarrollo en el embrión (y las células) tenían la potencialidad de crear estructuras tisulares determinadas, pero para ello debían recibir el estímulo adecuado. Esto encaja muy bien con la actual concepción del organizador de Spemann y Mongold: hay muchos procesos embrionarios que no están determinados directamente por la genética, sino que se dan por una interacción de nivel superior entre efectores producidos por los tejidos en desarrollo. Evidentemente hay una naturaleza genética basal, pero la formación de la estructura se debe a una interacción. Incluso, la forma final de un órgano (como ocurre por ejemplo en los dientes o las plumas) puede deberse a que esta interacción se produce en unas condiciones de limitación física del crecimiento y, por tanto, sin esa limitación y bajo el mismo contexto

¹³³ El término se refiere a un proceso en el cual estaría implicado un estímulo emitido por una porción embrionaria que “liberaría” la expresión de una “potencia preexistente” en otra porción. Este término era de uso corriente a principios del siglo XX en la embriología europea para describir este fenómeno que más tarde se concretarían en términos de “organizador” Spemann y Mongold. Herbst utilizaba la analogía de una válvula de vapor que gira gracias al incremento de la presión dentro de un recipiente o tubo. La válvula tiene la capacidad de girar, pero sin ese incremento de la presión es incapaz de hacerlo. Este embriólogo alemán, por otra parte, atribuía el origen del término a otro gigante de la embriología y de la histología: Rudolf Virchow. Su compañero de trabajo científico, Hans Driesch, realizó estudios sobre el viaje de ciertas células mesenquimáticas durante el desarrollo embrionario. Con técnicas tan rudimentarias como el “sacudido manual” de los embriones y de determinadas regiones del embrión, consiguió desplazar algunas partes de tejido hacia otros lugares. Estas células, que ya había pasado su “período de estimulación” producían las estructuras para las cuales ya tenían una “potencia preexistente” en otros lugares del embrión.

de expresión genética y de patrón de efectores, la morfología sería completamente diferente. Hay mucha vida más allá de la genética.

Ya hemos visto los efectos sobre el plancton del glifosato y sus diversos preparados comerciales. Aquí vamos a ver cómo en diferentes animales marinos, especialmente en moluscos, el glifosato hace que el *Auslösung* (el organizador) funcione de forma anormal, además de causar múltiples interrupciones en la expresión normal de decenas de genes implicados en la fisiología básica de los organismos marinos. Lo que vamos a explicar a continuación ha sido revisado por Matozzo *et al.* (2020) en un excelente, y extenso texto, publicado en *Journal of Marine Science and Engineering*. Muchos de los trabajos presentes en la literatura científica sobre la teratogenia y genotoxicidad en organismos marinos del glifosato se han realizado en *Crassostrea gigas*¹³⁴, más conocida como ostra japonesa u ostra del pacífico. Estudios con concentraciones muy bajas han demostrado que entre 2,5 y 5 µg/L el Roundup® es capaz de incrementar significativamente el número de larvas velígeras¹³⁵ anormales. Además, yendo al detalle, se han observado efectos inflamatorios de todo tipo, como el aumento de la infiltración de hemocitos¹³⁶ en el manto de la ostra y efectos sobre la actividad enzimática destinada a detener los efectos de la oxidación.

¹³⁴ Actualmente, el nombre aceptado como la comunidad científica internacional es *Magallana gigas*. Su posición taxonómica ha sido reubicada en base a estudios moleculares y genéticos. Sin embargo, su nombre “clásico” sigue siendo aceptado como sinónimo y, por tanto, puede ser utilizado. Aquí se utiliza el sinónimo porque el cambio es muy reciente (año 2022).

¹³⁵ La larva velígera es el segundo estadio larval de los moluscos gasteópodos (caracoles y babosas) y bivalvos (mejillones, ostras y afines). El primer estadio larval, y que es compartido con otros muchos grupos de animales, se denomina larva trocófora. La larva velígera es planctónica y, cuando está preparada para realizar la metamorfosis y derivar en la forma adulta de la especie, viaja hacia el fondo para fijarse y metamorfosear.

¹³⁶ Los hemocitos son células análogas a nuestros glóbulos blancos. Son unas células, al igual que las nuestras, de naturaleza muy heterogénea: las hay con gránulos en su citoplasma con diferentes sustancias en su interior (hay una evidente analogía con los basófilos y los eosinófilos de los mamíferos, pero también hay otros tipos) y los hay relativamente indiferenciados y encargadas de la fagocitosis. También fagocitan aquellos hemocitos con gránulos citoplasmáticos.

También afecta la actividad de algunos enzimas encargados de la detoxificación, aumentando su actividad (en tubo digestivo por ejemplo) o disminuyéndola (en branquias)¹³⁷.

También se han realizado estudios sobre el mejillón mediterráneo *Mytilus galloprovincialis* a concentraciones entre 10 y 1000 µg/L. En estos estudios se trabajó sobre el conjunto de genes de la glándula digestiva de estos organismos¹³⁸. Realizaron una exposición de 21 días a estas concentraciones y se observó lo que se denomina el “perfil transcripcional”. En otras palabras, se midió la actividad de cada gen transcrito en las células de la glándula digestiva durante esa exposición y se comparó con respecto a un control. Para todas las concentraciones, había más de 100 genes que alteraban su expresión (211 genes alterados para la concentración más elevada). En un solo concepto: el glifosato es bioactivo. Es más, estos genes alterados implicaban varias funciones celulares esenciales: la señalización celular, el metabolismo energético o la homeóstasis del calcio. Después de esta exposición de 21 días también se observaron parámetros fisiológicos. A todas las concentraciones se producía un descenso del recuento de hemocitos totales, un incremento en su diámetro y volumen total, un incremento del pH en la linfa del molusco, variación significativa en los niveles de fosfatasa alcalina y un incremento de la actividad lactato deshidrogenasa en la linfa.

Vamos a traducir esto a efectos biológicos. Como hemos visto, los hemocitos son unas células especializadas de los moluscos encargadas de la defensa del organismo. Son el equivalente al sistema inmunitario celular de vertebrados: utilizan la fagocitosis y algunas reacciones extracelulares para mejorar la defensa. Su disminución en número, así como su aumento de volumen, indican una reducción de la capacidad defensiva de estos organismos a infecciones y/o parásitos. En la misma línea iría el incremento del pH linfático, pero es un indicador metabólico de

¹³⁷ Por ejemplo, el Roundup® afecta la expresión de la glutatión S-transferasa (GST). El glutatión interviene en algunos procesos de detoxificación celular, sobre todo en la eliminación de sustancias extrañas. La GST interviene en el proceso también.

¹³⁸ También denominada hepatopáncreas. Es un órgano complejo encargado de la producción de centenares de enzimas encargadas de la digestión. Como su propio nombre indica, es análoga funcionalmente a nuestro hígado y páncreas.

más amplio espectro. Nos está indicando que la alteración metabólica es generalizada como así lo indica el estudio del perfil transcripcional del hepatopáncreas. La lactato deshidrogenasa se encuentra en la mayor parte de tejidos. Al final, forma parte del metabolismo anaerobio utilizado por las células en situaciones de estrés y ausencia de suficiente oxígeno para realizar la respiración en las mitocondrias. Permite obtener energía celular a un rendimiento muy bajo. Sin embargo, el aumento de su actividad en la linfa lo que nos está indicando es que algunas de las células del cuerpo están perdiendo su integridad. Es un enzima que no debería estar “suelto” por el organismo, sino en las células. Es por ello que los autores de estos estudios interpretan que el aumento de actividad del enzima en la linfa indica una pérdida importante de la estabilidad de la membrana celular. Por último, los efectos sobre la acetil colinesterasa (AChE) nos están indicado afectación del sistema nervioso. Es un enzima encargado de la degradación del neurotransmisor acetilcolina (ACh). El efecto de la ACh suele ser activador y, sino es degradada mediante la AChE, sigue el proceso excitatorio. Por ejemplo, la ACh suele estar implicada en la activación de la secreción glandular. Si el organismo ya no necesita más secreción de una glándula determinada y es incapaz de detener el estímulo de la ACh porque el glifosato ha destruido la capacidad de la AChE de degradarlo, entonces el organismo tendrá un grave problema.

Hay otros trabajos realizados sobre *Ruditapes philippinarum*, un bivalvo muy apreciado en China y, al igual que el mejillón mediterráneo, cultivado a lo largo del planeta en múltiples países, sobre todo en el sudeste asiático, en Europa y América del norte. También se aplicaron concentraciones entre 10-1000 µg/L pero, esta vez, durante tan solo 7 días. Los resultados son similares a los obtenidos en *Mytilus* en lo que respecta al sistema inmune: descenso acusado del recuento de hemocitos y aumento de su volumen. En el mejillón pardo (*Perna perna*) los resultados replican los obtenidos para el daño en el sistema nervioso: se produjo una inhibición de hasta el 50% de la actividad de la AChE (eso sí, a concentraciones mucho más elevadas).

Matozzo et al. (2020), además, revisan otra evidencia disponible en otros organismos marinos como los copépodos, cangrejos, erizos

de mar, poliquetos y corales. Solamente encontraron efectos a concentraciones medioambientalmente relevantes en diversas especies de cangrejos, aunque sí encontraron que la dosis semiletal (LC_{50}) para la especie de poliqueto *Laeonereis acuta* pese a ser elevada para el Roundup® (8,19 mg/L a las 96h de exposición), producía los mismos efectos observados a menores concentraciones en los moluscos. Si el poliqueto no moría, lo que se observaba era que padecía una distorsión muy significativa en su capacidad para defenderse de los compuestos oxidantes¹³⁹. Todo ello fue observado a concentraciones de entre 3,25 mg/L y 5,35 mg/L. La LC_{50} para los adultos del copépodo *Acartia tonsa* se determinó en 1,77 mg/L, mientras que para los juveniles (larva nauplio¹⁴⁰ y estadios del J1-J4) de *Artemisa salina* la LC_{50} fue muchísimo más elevada (14,19 mg/L). Otra vez nos encontramos con una gran diversidad en la bioactividad del glifosato.

Este mismo fenómeno podemos observarlo en los cangrejos. Los estadios de megalopa¹⁴¹ de los cangrejos son una fase del desarrollo situada entre la larva zoea¹⁴², de vida libre acuática (y que forma parte

139 Disminución de la actividad de el enzima Superóxidodismutasa, bajada de la peroxidación lipídica, aumento del daño lipídico, etc., todo ello considerado por los autores como tremendamente grave.

140 La larva nauplio (nauplia o nauplius) es el primer estadio larval de los crustáceos. Se caracteriza por tener solamente tres pares de apéndices cefálicos (por 5 pares del adulto) y prácticamente ausencia de apéndices en el resto del cuerpo (por 8 en el tórax y 6 en el abdomen del adulto). Al microscopio destaca, además, el llamado “ojo nauplio”: un ocelo de gran tamaño en el centro del cefalón. Suelen ser parte muy importante del zooplancton, tanto en ecosistemas marinos, como de agua dulce.

141 La larva megalopa, o también llamada post-larva, es el último estadio larvario de los crustáceos malacostráceos. Es bastante similar al adulto y, por tanto, ya podemos observar toda la panoplia final de apéndices que éstos tienen. Son característicos los pleópodos, que darán lugar a los apéndices abdominales en el adulto.

142 Las larvas zoea son un conjunto de estadios intermedios del desarrollo vital de los crustáceos. Se sitúan entre la larva nauplio y la larva megalopa. Estos estadios larvales solamente los pasan el grupo de los malacostráceos, el grupo más numeroso de crustáceos (con unas 40.000 especies descritas). Los copépodos (unas 13.000) o los tecóstracos (con los cirrípedos a la cabeza) no tienen zoeas.

del zooplancton) y las fases juveniles, en las cuales la morfología de cangrejo ya la han alcanzado completamente. Este estadio de megalopa parece mucho más sensible al Roundup® plus que los juveniles: se ha estimado una LC_{50} de 6,28 mg/L para las megalopas y de 316 mg/L para los juveniles del cangrejo azul (*Callinectes sapidus*).

Por otro lado, ya hemos visto como hay diversos estudios teóricos que postulan que el glifosato es capaz de afectar las dinámicas poblacionales en diversos organismos acuáticos. Aquí hay más evidencias al respecto. Los trabajos realizados en el cangrejo de estuario *Neohelice granulata* muestran que, a bajas concentraciones, hay efectos claros sobre la capacidad de machos y hembras de producir nuevas generaciones. Los experimentos expusieron a 10-1000 µg/L a hembras y machos durante 90 y 30 días respectivamente. En las hembras se detectó una disminución del peso corporal en todas las concentraciones y un incremento de los “ovocitos vitelogénicos reabsorvidos”. En otras palabras, las hembras de esta especie de cangrejo están interpretando la exposición al glifosato como un estrés ambiental: dejan de comer, o la alimentación no es eficiente, y dan “marcha atrás” en la ovulación para disminuir esa inversión energética que no van a poder afrontar (están perdiendo peso). Otras experiencias con Roundup® Ultramax confirman los resultados: a 200 µg/L una mayor reabsorción de ovocitos vitelogénicos y pérdida de peso corporal. En los machos, se observó también una disminución de peso, una disminución de las proteínas totales en músculo, un incremento del glucógeno muscular y un aumento espectacular de los espermatozoides anormales.

¿Y qué ocurre con los grandes habitantes de nuestros mares? Hemos explicado brevemente que el pez cebra (*Danio rerio*) ve afectado el desarrollo embrionario de su sistema nervioso si se ve expuesto a glifosato. Dado que es un organismo modelo clásico en fisiología animal, hay bastante evidencia acumulado sobre los efectos del glifosato (y sus formulaciones comerciales) en el desarrollo del sistema nervioso, en la neurotransmisión, en el comportamiento, en los efectos sobre el metabolismo y en la inducción de estrés oxidativo e inflamación. Carmen Costas-Ferreira, junto con un equipo de biología funcional y de ciencias de la salud de la Universidad de Vigo (España) ha llevado a

cabo una revisión sobre los efectos del glifosato en el sistema nervioso de vertebrados. En Costas-Ferreira *et al.* (2022), además de encontrar estudios sobre los efectos del glifosato en mamíferos (ver capítulo 4), encontramos una abundante bibliografía sobre los hechos en el pez cebra y otros peces. La tesis que resumen la revisión es que, dado que la fisiología del sistema nervioso es similar en todos los vertebrados, los efectos observados en cuanto a la bioactividad del glifosato son, por ende, similares.

Hay al menos 21 estudios realizados sobre peces que demostrarían efectos deletéreos del glifosato sobre estos organismos, 8 de ellos realizados sobre *Danio rerio*. Por ejemplo, Melisa Faria *et al.* (2021) utilizaron concentraciones muy bajas de glifosato (0.3 y 3 µg/L durante dos semanas) perfectamente plausibles en cursos de agua dulce¹⁴³ y encontraron evidencias notables de deterioro de las conductas exploratorias y sociales, con un aumento de la ansiedad; un incremento de los niveles de serotonina y de la dopamina, de los metabolitos de la dopamina y de la proporción entre ellos y la dopamina (en otras palabras, el reciclado de la dopamina deja de funcionar correctamente) en el cerebro anterior del pez. También encontraron una regulación a la baja de los genes relacionados con el sistema dopaminérgico. Y, además de todo esto, se detectó una alteración del estado de la maquinaria enzimática, destinada al control de los radicales libres, clara señal de estrés oxidativo. Esto se repite en varios estudios recogidos en la revisión del grupo de Carmen Costas-Ferreira.

Otro estudio en *Danio rerio*, Daiane Bridi *et al.* (2017) demostró que el glifosato (y la versión comercial Roundup®), también a concentraciones bajas¹⁴⁴, producía una evidente alteración de la locomoción en las larvas del pez, produciendo además comportamientos aversivos en ausencia de estímulo depredador. En otras palabras: los peces reaccionaban como si hubiera depredadores. ¿Estaban sufriendo alucinaciones? También descendió la cantidad de veces que los peces se movían,

¹⁴³ *Danio rerio* es un pez de agua dulce.

¹⁴⁴ En este caso se trataron los peces durante 4 días a concentraciones de glifosato y Roundup® de entre 10 y 500 µg/L.

y la distancia de los desplazamientos y se produjo una disminución de los comportamientos de combate. Produjo, además, deterioro en la memoria de los *Danio rerio* adultos.

Arrakis

La literatura es una forma esencialmente estética de acercarnos a la realidad. No es lo mismo intentar, por ejemplo, definir un clásico de la literatura por el número de ventas que ha conseguido a lo largo de un periodo determinado o su impacto medido como el número de citas recogidas a lo largo del tiempo en una selección aleatoria de ensayos, que decir que un clásico es *“aquel que cuanto más cree uno conocerlos de oídas, tanto más nuevos, inesperados, inéditos resultan al leerlos de verdad”*. Una preciosa manera de decir que siempre tienen algo nuevo que decirnos. Sus interpretaciones nunca se acaban.

Esto le ocurre al clásico de la ciencia ficción de Frank Herbert *“Dune”*. Y tiene mucho que enseñarnos porque está escrito en un contexto de guerra fría (entre EE.UU. y la URSS) y guerra caliente (de EE.UU. contra Vietnam); en un contexto en el que la civilización de los recursos fósiles comenzó a notar, por primera vez, que estos podían acabarse (crisis del petróleo de 1973). Podemos leer en *Dune*:

*“Lo que no entiende de un ecosistema aquel que no está versado en ecología, es que trata de un sistema. ¡Un sistema! Un sistema mantiene una cierta estabilidad fluida que puede ser destruida con un simple paso en falso en un solo nicho ecológico. Un sistema obedece a un orden y está armonizado de uno a otro extremo. Si algo falla en el flujo, todo el orden se viene abajo. Una persona no adiestrada puede no darse cuenta de ese colapso hasta que sea demasiado tarde. Por eso, la función más importante de la ecología es la comprensión de las consecuencias”*¹⁴⁵.

Está claro que nuestro aparato político e institucional de decisión se puede definir de muchas formas, menos ecologista: en absoluto elabora

¹⁴⁵ Herbert (2021), p. 727.

la normativa comprendiendo las consecuencias de una determinada actividad económica. Trabaja regulando, limitando y mitigando algunas de las externalidades conocidas, sin conocer el sistema al completo. Y solamente lo hace porque esa regulación protege al capital de una determinada región sobre el de otra.

La historia de Arrakis, de *Dune*, nos enseña que puede ocurrir cuando desestabilizamos un sistema planetario. Lo estamos haciendo con la emisión descontrolada de CO₂ a nuestra atmósfera. Lo estamos haciendo con la destrucción del territorio. Lo estamos haciendo al verter sobre nuestros mares y nuestras tierras sustancias de las cuales desconocemos buena parte de los efectos que causan. Lo estamos haciendo con el glifosato.

Ecosistemas terrestres

Los líquenes como “ecosistema modelo” que muestran la capacidad disruptiva del glifosato

Los líquenes son fascinantes. Desafían la intrínseca habilidad humana para la clasificación y perturban nuestra ansiedad por el orden. Desde el punto de vista de la historia de la ciencia son polémicos porque todavía se discute quien, y cómo, descubrió la naturaleza simbiótica de este organismo: el podio se lo disputan el botánico de la Universidad de Munich Simon Schwendene, el botánico de la Universidad de Friburgo Anton De Bary, y el genial y todoterreno Albert Bernhard Frank de la Universidad de Leipzig. Schwendene fue el primero en describir la naturaleza dual del líquen. Un hongo y un alga se entrelazaban bajo las lentes del microscopio de este suizo de nacimiento. Lo describió aproximadamente en 1867. Frank, pionero en la comprensión biológica de la vida (y que había acuñado el término micorriza y algunos términos como el de autotrofia y tropismo para describir algunas interacciones ecológicas), utilizó el término simbiosis para definir la ecología del líquen tras estudiar 5 talos liquénicos¹⁴⁶ en 1876. Estábamos realmente ante una interacción entre, al menos, dos organismos distintos. Pero a Frank casi nadie lo recuerda como estudioso de los líquenes ¿Su pecado? Ser un biólogo que, igual que estudiaba las enfermedades

¹⁴⁶ El talo liquénico, o simplemente talo, es el término mediante el cual nos referimos al tejido conformado por las hifas de los hongos y las células algales que componen el líquen. Además, dentro del tejido, también viven otros organismos. Las liquenólogas Lucía Muggia o Eva Barreno han hipotetizado que los talos liquénicos, al igual que los embriones de las plantas o de animales, poseen una ontogenia determinada. Es decir, se podría hablar de “desarrollo embrionario” del líquen. Quizá lo que más nos convenza de la realidad tisular de un líquen y, por tanto, de su complejidad como comunidad (o superorganismo) es observar un corte histológico al microscopio. Hay estructura. Hay partes diferenciadas. Por tanto, el término tejido es más que apropiado [ciclo de conferencias “*La Tierra simbiótica: como Lynn Margulis inició una revolución científica*”, 2021. Universitat de València].

vegetales y proporcionaba ideas innovadoras para la mejora de los cultivos, estudiaba los líquenes o los helechos. Por ello, su trabajo quedó enterrado entre diferentes “líneas de investigación” que mantenía abiertas. De Bary sí que especializó sus estudios en los líquenes y, basándose en los trabajos de estos dos autores, y otras muchas personas que previamente había abierto camino, realizó una serie de trabajos que mantendrían ocupado a lo largo de varios lustros y en los cuales profundizaría en la naturaleza simbiótica de estos organismos. El primero de ellos lo publicó en 1878. Esto le ha valido quedar como “el descubridor” de esa dualidad de los líquenes.

Desde el punto de vista de la historia de la vida nos muestran como, una y otra vez, el mutualismo y el mutualismo íntimo¹⁴⁷ se muestran como una fórmula exitosa ante la evolución. El propio origen de todo nuestro linaje evolutivo lleva en su seno el mutualismo íntimo entre bacterias capaces de oxidar materia orgánica para obtener energía y/o bacterias capaces de obtener energía química a través de los fotones provenientes del sol, con una célula pre-eucariota probablemente depredadora¹⁴⁸. Pero, nada en biología dura para siempre. Lo que desde

147 Breve debate sobre el término simbiosis y mutualismo íntimo. De Bary empleó el término simbiosis para referirse a asociaciones íntimas, generalmente con resultados beneficiosos para las especies que intervienen (aunque no siempre: podían ser comensalistas, mutualistas o, incluso, parasitarias). Pero con el transcurso del siglo XX el término simbiosis se asoció popularmente al concepto de unión íntima con beneficio mutuo. Para salir de este conflicto conceptual el ecólogo John N. Thompson en “*El proceso coevolutivo*” habla de mutualismo íntimo para referirse a esas simbiosis que sí resultan en un beneficio mutuo.

148 Breve explicación de los eucariotas y de la teoría endosimbiótica. Tras enviar el artículo a más de 19 revistas, y ser rechazado por considerarlo “poco respaldado empíricamente” (eufemismo de que lo rechazaban porque era demasiado revolucionario y estaba escrito por una mujer), Lynn Margulis (entonces casada con Carl Sagan y, por tanto, artículo firmado como Lynn Sagan) publicaba en 1969 su archiconocida teoría de la endosimbiosis en la cual postulaba que el origen evolutivo de las células eucariotas (células con núcleo y mitocondrias, además de otros orgánulos membranosos intracelulares) teníamos que situarlo en la simbiosis de dos células procariotas (células sin núcleo ni orgánulos membranosos intracelulares), una probablemente depredadora y otra capaz de utilizar el oxígeno existente disuelto en el agua y la materia orgánica en CO₂ y agua. Esta célula eucariota sería capaz de realizar posteriormente, a lo largo de su ya ramificada genealogía evolutiva, múltiples endosimbiosis. Algunas de ellas darían lugar a los organismos fotosintéticos.

1876 y, hasta 2015, había sido una “simple” interacción entre 2 especies, en 2016 tras el excelente trabajo de Spribille y su equipo, aparecían como componente de las simbiosis un tercer elemento: las levaduras. Previamente a este trabajo también se conocía la elevada prevalencia de elementos bacterianos dentro de los talos líquénicos. Estamos hablando, por tanto, de un superorganismo¹⁴⁹ que ya no solo tiene 2 especies en su interior, si que puede tener muchas más. Todavía hoy se sigue indagando sobre la importancia de estos nuevos elementos hallados en los líquenes: ¿están presentes en todos los líquenes? ¿Qué rol juegan en el desarrollo de la forma final del líquen?, ¿se reproducen conjuntamente? Pero parece evidente que el concepto de líquen está mutando y hoy en día parece más un ecosistema en evolución. Sí, los ecosistemas pueden evolucionar y el ser humano puede destruir las interacciones que en ellos se dan.

Así que, además del tradicional uso de estos complejos seres como indicadores de contaminación atmosférica, su uso como índices naturales cobra un nuevo sentido: ¿cómo está afectando un determinado compuesto a las interacciones que se dan en un sistema complejo? Bajo este prisma del ecosistema en miniatura, vamos a ver qué ocurre con el glifosato y con el preparado comercial Glifene SLs® cuando es aplicado, ya sea por inmersión o por *spraying*, a diferentes “especies”

149 ¿Qué es un organismo?, ¿son los líquenes organismos, comunidades o ecosistemas? Sirva como reflexión esta cita de Wagensberg (2010): “*Entre los biólogos, el concepto de individuo se confunde bastante bien con la palabra organismo. [...] A veces se da el nombre de superorganismo a una sociedad de insectos, una colonia de hormigas, por ejemplo. Y todo ello con la decidida protesta de muchos científicos por un presunto abuso del lenguaje. La idea de que varios individuos se pongan de acuerdo para fabricar una nueva individualidad de rango superior se suele considerar una anécdota: si, parece un superorganismo, pero llamarle así no deja de ser una manera de hablar. [...] Según este punto de vista, sólo hay una manera de ser un individuo. Se es un individuo o no se es un individuo. El concepto individuo sólo tiene dos grados: uno o cero. Ser o no ser. [...] Bien. Pues supongamos que no es así. Supongamos que llamamos individuo al máximo grado posible de individualidad que puede alcanzar una colectividad de (otros) individuos. Supongamos que la individualidad tiene grados entre un mínimo (un simple montón de individuos que no interacción entre sí) y un máximo (equiparable a un nuevo organismo)*”. pp.141-142.

de líquenes¹⁵⁰: *Parmotrema tinctorum*, *Usnea barbata* y *Xanthoria parietina*.

Andrea Vannini *et al.* (2016) han estudiado la bioacumulación de glifosato y el desacoplamiento de las relaciones interespecíficas del líquen *X. parietina* a través de algunos indicadores¹⁵¹. Sometieron al líquen a tratamientos de entre 24-96 h y a concentraciones de 3,6 g/L y 36 g/L¹⁵² de glifosato sin aditivos. Encontraron que, tanto el ergosterol, como la clorofila *a*, sufrían grandes descensos a ambas concentraciones. De hecho, a la concentración más elevada estos dos indicadores mostraban una elevada mortalidad celular del hongo y del alga: reducciones en la cantidad de ergosterol entre el 18-63% y de actividad fotosintética de entre el 33% y el 85%.

Y en cuanto a la bioacumulación del glifosato, ya hemos visto anteriormente los trabajos de Laitinen *et al.* (2007) y de Helander *et al.* (2018) donde se muestra la capacidad del herbicida para penetrar a través de los estomas de la hoja de las plantas, transferirse a los vasos

¹⁵⁰ Como dicen Lynn Margulis y Eva Barrero, en su reseña sobre *Lichens of North America*, "los líquenes, por supuesto, pueden clasificarse apropiadamente como cualquier otro organismo. Después de todo, los organismos visibles (plantas, animales, protoctistas y hongos) son al menos compuestos duales. De hecho, la mayoría evolucionó a partir de asociaciones simbióticas triples, cuádruples y de orden superior. La individualidad, en el mundo de los organismos nucleados (eucariotas, visibles), es compuesta, compleja y multidimensional a nivel genético, morfológico, de desarrollo, fisiológico y biológico molecular. Por lo tanto, los líquenes ejemplifican la diferencia fundamental entre la vida bacteriana (procariótica) y cualquier otra forma de vida y reciben el nombre, como casi todos los eucariotas, del miembro más conspicuo del consorcio simbiótico. En el caso de los líquenes, esto significa que reciben el nombre del micobionte, el hongo, en lugar del fotobionte, el alga o la cianobacteria".

¹⁵¹ Concretamente utilizaron el ergosterol y la clorofila *a*. El ergosterol es un lípido complejo, similar al colesterol, que cumple las mismas funciones en la membrana plasmática que el colesterol en las células animales: incrementar la fluidez de la membrana celular y permitir el movimiento de las diferentes proteínas.

¹⁵² Son concentraciones elevadas fuera de los campos de cultivo. Sin embargo, 3,6 g/L están bastante por debajo de la concentración recomendada de aplicación, y 36 g/L es la concentración máxima recomendada de uso. Esto quiere decir que, mediante spraying, estas dosis pueden ser recibidas por los líquenes en los bosques cercanos a un campo de cultivo.

conductores de la sabia bruta (xilema) y elaborada (floema), y exudarse por las raíces, y viceversa (penetrar por las raíces hacia la planta) y que eso deriva en una mayor permanencia del herbicida en la planta y en el suelo. Este mismo patrón de bioacumulación lo vemos en los líquenes. El talo líquénico de *X. parietina* aumenta su concentración de glifosato conforme se incrementa el tiempo de exposición a una determinada concentración de herbicida. Por ejemplo, tras 24 h tras una exposición por spraying a 3,6 g/L, la concentración de glifosato en el talo era de 3,5 µg/mg. Si la aplicación se repite durante 5 días, al quinto día la concentración fue de 4,3 µg/L: un 22,9% más. Lo mismo ocurre a concentraciones más elevadas y con el tratamiento de inmersión: los incrementos de concentración de glifosato oscilaron entre el 2,9-25,2%. La concentración de 3,5 µg/mg obtenida a las 24 h de un tratamiento de 3,6 g/L se mantuvo durante 90 días. No podría definirse mejor un compuesto bioacumulable.

Los mismos autores en Vannini *et al.* (2015) hicieron un estudio similar, con el mismo líquen, pero con Glifense SIs®. Los resultados también fueron similares: afectación del hongo y del alga simbiótica y bioacumulación de glifosato. Dos Santos *et al.* (2023) han trabajado sobre *P. tinctorum* y *U. barbata* y a concentraciones entre 4,8 mg/L y 19,2 mg/L. El estudio es mucho más detallado en cuanto a la cantidad de mortalidad celular causada en el talo, sobre todo en lo que respecta al alga. Los cálculos del modelo lineal empleado nos proporciona una tasa de entre un 2,5-4% de mortalidad para el alga cada incremento de 1 mg/L, aunque hay diferencias entre ambos líquenes. Los más llamativo del estudio son los análisis realizados a través de fluorescencia completa del líquen: se ve claramente cómo la fluorescencia de la clorofila *a* se va "apagando" conforme se incrementa la concentración. Es decir, confirman los resultados de la actividad fotosintética obtenidos por Vannini *et al.* (2016) y otros autores ya citados, en este caso mediante una técnica tremendamente gráfica.

Los vertebrados terrestres también se ven afectados por el glifosato

Varias generaciones de biólogos hemos crecido con el concepto de “especie paraguas”. En su esencia, el concepto focaliza la complejidad de las redes ecosistémicas en una sola especie. La idea es que, seleccionando adecuadamente la figura administrativa de protección, poner un escudo sobre una sola especie puede servir para proteger a muchas más. Según Roberge y Angelstam (2004), debemos rastrear el uso de este concepto hasta 1981 cuando Otto Herzberg Frankel y Michael E. Soulé describieron en su *Conservation and evolution* un tipo de política pública de conservación destinada a proteger las especies de mayor tamaño de un ecosistema para crear “especies densas” o especies bajo cuyo “paraguas” cayera indirectamente la protección de otras muchas. Pocos años después, en 1984, Bruce A. Wilcox utilizó ya la etiqueta “especies paraguas” en el mismo sentido que Frankel y Soulé para aquellas políticas públicas destinadas a proteger a aquellas especies que tuvieran un hábitat tan amplio como el espacio natural que se quisiera proteger. Dado que las especies grandes suelen tener áreas de distribución y/o hábitats locales más grandes, “*se ha favorecido a los organismos de gran tamaño como posibles paraguas*” afirman Roberge y Angelstam.

Robert J. Lambeck le dio la vuelta al planteamiento en 1997. Si las especies paraguas, digámoslo así, plantean la conservación de arriba (el paraguas) a abajo (las especies protegidas por el paraguas), Lambeck pensó que, en primer lugar debíamos examinar las potenciales amenazas que recibe un ecosistema dado para, posteriormente, ver qué especie está más en riesgo por dicha amenaza. Son lo que denominó “especies focales”. Protegiéndolas, se protege a todo el ecosistema de múltiples peligros. Para Roberge y Angelstam esta forma de concepto “extendido” de especie paraguas es la que, según su análisis de la literatura científica disponible, muestra una mayor posibilidad de protección.

Independientemente de la opción por la que nos decantemos, lo que reflejan estos dos conceptos de la biología de la conservación es

una realidad más amplia y que responde a la naturaleza de todo sistema complejo, como lo es un ecosistema: la capacidad de resiliencia, de auto-organización y la modularidad de un sistema complejo dependen de la cantidad y cualidad de interacciones y relaciones entre sus partes. Un ecosistema con un elevado número de especies, que cumplen un variado número de funciones ecosistémicas y que se distribuyen diversamente, tanto espacial, como temporalmente, es un ecosistema capaz de autoperpetuarse porque, si sufre una perturbación, tiene todas las funciones imaginables dentro de un ecosistema por duplicado (o triplicado, o más allá). Por el contrario, un ecosistema que por ejemplo dependa de una única especie que proporcione toda la producción primaria del mismo, es un ecosistema terriblemente sensible. Cualquier cosa que afecte a esta especie acabará probablemente con el sistema. Todas estas particularidades de los sistemas complejos las explicó de maravilla Donella Meadows en sus apuntes de profesora del Massachusetts Institute of Technology (MIT), editados bajo el título de *Pensar en sistemas*.

Ricard Solé, un heredero intelectual de Meadows y experto en la teoría de la complejidad habla de los “nodos hiperconectados” en una red. Un ecosistema, es muchas cosas. También es una red de interacciones: dos o tres especies de hongos pueden estar descomponiendo materia orgánica y, gracias a eso, son capaces de producir cuerpos fructíferos (setas) que, a la vez que producen esporas y se autoperpetúan, éstas están sirviendo de alimento a varias larvas de insectos edáficos que, a su vez son parasitadas por algunos nemátodos y son depredadas por algún pájaro o micro-mamífero y, todo ello, ocurre bajo la protección de un enorme pino que había establecido una relación simbiótica con los hongos y que es el hogar del pajarillo y el mamífero. En sus *redes complejas* habla de estos nodos, o *hubs*, como elementos centrales de una red compleja. Hay especies que presentan analogías con estos nodos: reciben todo tipo de interacciones. Gracias a ellas, realmente el ecosistema persiste. Pero también el ecosistema es menos resiliente si presenta especies de este tipo.

Este enfoque sobre las especies paraguas y las especies focales con un fondo de teoría de la complejidad nos puede servir, tanto para

comprender que la afectación de una especie clave por el herbicida glifosato puede hacer caer varias “fichas de dominó” del ecosistema de una tacada y simplificar la cadena trófica de una manera no comprensible inicialmente, como de excusa para recopilar algunos de los trabajos más relevantes que analizan los efectos del glifosato en organismos con una biología muy similar a la humana. Vamos ver qué nos dice la evidencia disponible sobre el efecto del glifosato en los vertebrados.

En primer lugar, para saber si las concentraciones de glifosato y de preparados comerciales en base a glifosato utilizadas por el cuerpo de evidencia disponible son relevantes, debemos saber qué concentraciones del herbicida podemos encontrar en contextos vitales los organismos de mayor tamaño. Por restricciones metodológicas obvias, los datos sobre fluidos internos y órganos corresponden a animales domesticados por el ser humano, que son criados con alimentación controlada por los mismos y en ambientes artificiales cercanos a las zonas de aplicación habitual del glifosato. También es el momento de exponer qué concentraciones de glifosato podemos encontrar en los seres humanos.

Monika Krüger, junto a un nutrido equipo de la Facultad de veterinaria de la Universidad de Leipzig, estudiaron en 2014 mediante la técnica ELISA¹⁵³ y la Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas¹⁵⁴ (GC-MS por sus siglas en inglés) la concentración de glifosato en orina de vacas, conejos, liebres de vida libre, y seres humanos, y la bioacumulación del herbicida en diferentes órganos de vacas y conejos. Además introdujeron una variable medioambiental de “estilo productivo”: compararon localidades libres del cultivo de OMG y aquellas que tenían una agricultura convencional, incluida la de los OMG.

¹⁵³ El funcionamiento básico de la técnica ELISA se basa en la especificidad que tienen los anticuerpos para unirse a una sustancia. Una vez se ha “pasado” la muestra por este “filtro” de anticuerpos, podemos “revelar” (como si de un negativo se tratase) la cantidad de sustancia objetivo que tiene la muestra.

¹⁵⁴ Es una técnica compleja que se basa en las diferencias que tienen los átomos en cuanto a su relación entre masa y carga. Permite una gran precisión. Con esta técnica puede identificarse la composición atómica exacta de una determinada molécula, por ejemplo.

¿Qué datos obtuvieron? La orina de las vacas que se criaron en zonas de agricultura convencional tenían un promedio de 22 µg/L mientras que las vacas criadas en zonas libres de cultivo de OMG presentaban valores cercanos a la no detección (de unos 2 µg/L). Las liebres tenían concentraciones en su orina sensiblemente menores que los conejos criados en cautiverio. Un promedio de 25 µg/L frente a uno de 70 µg/L. Los órganos de las vacas analizadas revelan concentraciones similares en todos los tejidos que rondan los 20 µg/Kg, destacando el hígado con concentraciones que se aproximan a los 40 µg/Kg. Para el estudio de concentraciones en orina de humanos se separó la población de estudio en dos grupos: un grupo con una alimentación convencional y otro grupo con una alimentación predominantemente basada en productos orgánicos. Las diferencias fueron estadísticamente significativas pero para ambas poblaciones estamos hablando de concentraciones entre 0,5-2 µg/L (promedio de 1,8 µg/L), con picos entre 4-6 µg/L para personas con alguna enfermedad crónica.

En cuanto a las concentraciones de glifosato en orina humana hay múltiples trabajos. Christina Gillezeau *et al.* (2019) los han recogido y puesto en perspectiva. Por ejemplo, hay un grupo de estudios tratados que enfocan su análisis en cómo una exposición ocupacional al glifosato puede verse reflejada en un incremento de la concentración del herbicida en la orina o en cómo una población crónicamente expuesta al mismo tiene unas medias significativamente superiores a la población general. En este sentido, queda demostrado que las personas que utilizan glifosato en su trabajo ven incrementada la concentración del mismo en la orina pocas horas después de la exposición. Pueden pasar de una concentración promedio en orina de 0,71-1,08 µg/L a una de 1,35-1,72 µg/L (trabajos realizados en Irlanda). Otro estudio hecho en Francia mostró la misma tendencia: tras trabajar con glifosato en el campo, el promedio de concentración del herbicida en la orina fue de 9,5 µg/L mientras que dos días después la concentración había bajado a 2 µg/L. La población que vive en regiones donde el uso del glifosato como herramienta agrícola es alto, la concentraciones en orina oscilaban entre 1,6-6,4 µg/L para las personas trabajadoras que más frecuentemente entraban en contacto con él, hasta los 1,9 µg/L en menores de edad o

1,1 µg/L en las personas adultas que no frecuentaban el campo como lugar de trabajo. A destacar un estudio realizado en Sri Lanka donde el promedio de la concentración de glifosato en orina fue de 73,5 µg/L.

Este último es un trabajo que merece un comentario más en profundidad. La “nefropatía agrícola de Sri Lanka” (SAN por su siglas en inglés) es un tipo de patología renal que deriva en una incapacidad física del organismo por acumulación de múltiples electrolitos en sangre a niveles tóxicos. Esto puede ocurrir en personas con problemas circulatorios y en una avanzada edad. Lo que no es normal es que ocurra en personas adultas en condiciones físicas óptimas. Esta nefropatía se ha relacionado con un elevado nivel de metales pesados en el organismo junto a la acción conjunta del herbicida glifosato, usado de forma intensa en los bancales arroceros de la Isla. Así, el rango de concentraciones observado en este trabajo encabezado por Channa Jayasumana es de 61,0-195,1 µg por cada gramo de creatinina en la orina y de 28,6-80 µg/L en orina (sin ajustar por unidad de creatinina)¹⁵⁵. Una absoluta barbaridad.

En la población en general encontramos concentraciones generalmente menores. En adultos los promedios de los diferentes estudios oscilan entre 0,16 µg/L en pescadores urbanos en México, hasta los 1,5 µg/L de habitantes urbanos de Iowa (EE.UU.) o los 1,8 µg/L del citado estudio de Krüger *et al.* (2014). Sin embargo hay varios datos a destacar. Por ejemplo: los menores de edad tienden a tener concentraciones mayores en orina (1,96 µg/L en un trabajo realizado en Dinamarca o 2,5 µg/L en Iowa). Las embarazadas también tiende a mostrar concentraciones disímiles: en algunos trabajos son incapaces de detectar nada en orina o las

¹⁵⁵ Al realizar este ajuste en base a la principal proteína presente en orina, el grupo de investigación lo que busca es poder comparar, tanto la cantidad de glifosato y otros herbicidas, como la concentración de metales pesados. Estos metales eran los principales sospechosos en la etiología del SAN. Sin embargo, lo descubierto aquí, es que la principal diferencia entre los diferentes grupos de personas estudiados es que, aquellos que viven donde el SAN es endémico y está en proporciones que ya se han convertido en un problema de salud pública, tienen también elevadas concentraciones en orina del herbicida (tanto enfermos, como personas sanas). Sin embargo, esta concentración de glifosato cae a niveles “razonables” (de 3,3 µg/L o 2,4 µg/g de creatinina) en zonas sin elevada incidencia del SAN. El resto de metales pesados está fuera de rango en todos los grupos poblacionales analizados.

concentraciones son sensiblemente menores a las de la población general (por ejemplo, los 0,28 µg/L detectados en un trabajo realizado en los estados de Washington e Idaho de Estados Unidos), mientras que en otros estudios realizados en plasma sanguíneo o de cordón umbilical (hecho éste en Tailandia) sí que detectan el herbicida, y a concentraciones no desdeñables (el promedio sérico en sangre es de 17,5 µg/L y el del cordón umbilical de 0,2 µg/L), aunque con una tasa de negatividad de las muestras cercana al 50%. En el estudio de los dos estados estadounidenses la positividad era del 92,5%. En trabajos más recientes como el realizado por Jillian Ashley-Martin *et al.* (2023), y realizados con técnicas más sensibles de detección, se ha podido estimar que casi $\frac{3}{4}$ partes de una población de mujeres embarazadas de un país del norte global, como Canadá, dan positivo en la orina a Glifosato y AMPA, con una concentración promedio de 0,112 µg/L y 0,159 µg/L respectivamente.

También hay un trabajo, Aris & Leblanc (2011) que, aunque no es capaz de detectar glifosato en la sangre de mujeres embarazadas, sí que lo detecta en el 5% de las mujeres de la población general con un promedio dentro de este pequeño porcentaje de mujeres que era sorprendentemente alto: 73,6 µg/L. Hay también estudios que han generado polémica en cuanto a la concentración del glifosato en la leche materna. Ninguno de los trabajos revisados por Gillezeau *et al.* (2019) consigue obtener muestras que estén por encima del nivel de detección de la prueba analítica utilizada. En 2014 un trabajo realizado por la asociación *Moms Across America* analizó 40 muestras de orina y 10 muestras de leche materna. En 3 de las muestras de leche se detectaron 76-166 µg/L de glifosato¹⁵⁶. Solamente $\frac{1}{3}$ de las muestras de orina dio positivo¹⁵⁷ y el promedio de las que dio positivo superaba los 10 µg/L. Como hemos visto no son datos tan descabellados, ni si quiera teniendo en cuenta que este trabajo se realizó mediante la iniciativa popular y que no pudieron acceder a los mismos equipos técnicos que la oficina técnica de una multinacional, por ejemplo. Sin embargo, el

¹⁵⁶ El resto de muestras estaban por debajo del nivel de detección, muy alto para los estándares normales (75 µg/L).

¹⁵⁷ También con un umbral de detección elevado para la orina (de 7,5 µg/L) y más aún viendo los datos de los trabajos citados.

trabajo mereció respuesta por parte de la industria. James S. Bus (2015), que recibió financiación de la *The Joint Glyphosate Task Force*¹⁵⁸, se vio en la obligación de contestar con un detallado artículo sobre porqué fisiológicamente los resultados de Honeycutt & Rowlands (2014) para *Moms Across America* eran “implausibles” e “inconsistentes”.

Las técnicas de análisis en lácteos de este herbicida han ido mejorando. Siempre los niveles mínimos de detección habían sido del orden de 10 veces superiores en la leche materna que en agua o en orina. En un trabajo realizado en la zona del Estado de Paraná, en Brasil, por M. Camiccia *et al.* (2022) ha detectado un promedio de 1,45 µg/L de glifosato en la leche. Quizá James S. Bus esté algo enfadado.

Otra mención a parte merecen los trabajos realizados en zonas donde el uso del glifosato es, poco menos, que un arma de guerra. En Colombia, los sucesivos gobiernos desde los años 1970-1980 en nombre de la lucha contra la guerrilla, utilizaron este herbicida para destruir los cultivos cocaleros que supuestamente financiaban la guerrilla a través del tráfico de drogas. Incluso a través de las propias películas de Hollywood sabemos que este relato es algo maniqueo: muchos dirigentes colombianos y de la burguesía de Miami y otros lugares han utilizado este comercio para enriquecerse. El propio John F. Kennedy (35º presidente de los Estados Unidos) pudo ser asesinado gracias al flujo de dinero que provenía ya desde el llamado patio trasero estadounidense¹⁵⁹.

158 Grupo formado por representantes de las empresas que “poseen registros técnicos para el glifosato”. En palabras más sencillas: un grupo de trabajo compuesto por las empresas que venden glifosato y que busca influir en las agencias de regulación. El mismo grupo surge “en respuesta a los requisitos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Autoridad Reguladora de Gestión de Plagas sanitarias de Canadá” [cf. Bus (2015)]

159 A este respecto se puede revisar el libro que escribió James Carothers Garrison, el que fuera el fiscal de distrito de Orleans Parish (Luisiana, Estados Unidos). Esta persona, en calidad de fiscal, llevó a cabo una investigación sobre el caso JFK: “JFK. tras la pista de los asesinos” (1992). También se puede consultar la obra del periodista del New York Times, Jim Marrs, “Crossfire: the plot that killed Kennedy” (2013). Y para una revisión cinematográfica se puede visualizar el ya clásico de Oliver Stone “JFK: caso abierto” (1991) y su secuela en forma de documental “JFK: caso revisado” (2021).

Sin entrar más en estos oscuros hechos, debemos conocer que la defoliación de estos cultivos de coca se realizó en base a fumigaciones masivas de glifosato de las montañas colombianas a través de los *Programs to Eradicate Illicit Crops*. En un trabajo realizado por Marcela Varona *et al.* (2009) encontraron que, en la orina de los habitantes de estas regiones, el glifosato se encontraba en una concentración de 18,6 µg/L y el AMPA en una de 58,8 µg/L.

Pero, ¿estas excreciones urinarias de glifosato y AMPA a qué exposición oral y/o tópica pueden corresponder? Seguiremos tomando al ser humano como “organismo de estudio” porque los estudios realizados también son relevantes para cuando estudiemos la bioactividad observada en humanos. Vamos a ponernos en el cuerpo, siempre bien alimentado, del detective más famoso inventado por Manuel Vázquez Montalbán, Pepe Carvalho, y vamos a razonar: ¿Es lógico que, una vez expuestos a una sustancia, esta nos atravesase sin interactuar con ninguna de las moléculas de nuestro cuerpo? No, no parece razonable. Si esto es así, lo lógico es que parte de la sustancia se transforme en otra, interactúe, se quede en nuestro cuerpo, etc. Si ingerimos un determinado alimento contaminado con una cantidad conocida de glifosato no podemos esperar que todo el herbicida sea excretado en las heces y en la orina. Para empezar, va a interactuar seguro con nuestra biota intestinal, desactivando total o parcialmente la EPSE sintetasa y causando una mortalidad diferencial. Algunos grupos de investigación han propuesto la concentración en orina del glifosato y el AMPA como un estimador de la exposición oral al herbicida. Zoller *et al.* (2020) han estimado que solamente el 1% de la dosis oral recibida de glifosato es excretada por la orina, mientras que para el AMPA es del 23%. Esto estaría indicando que concentraciones promedio frecuentes observadas en diferentes poblaciones humanas, como 1 µg/L, corresponden a exposiciones orales crónicas elevadas (100 µg/L) y con relevancia fisiológica como veremos.

Ya sabemos a qué concentraciones puede el cuerpo de un vertebrado excretar el glifosato en orina, Anteriormente, ya habíamos repasado las concentraciones medioambientalmente relevantes y a las que, por tanto, los organismos en general pueden verse expuestos. Vamos a

seguir repasando los efectos de estas concentraciones. Para realizar esto, tenemos que dividir la ingente literatura científica disponible. A efectos de comprender mejor los efectos del glifosato sobre los ecosistemas terrestres y (si se quiere en términos taxonómicos) sobre los vertebrados, vamos a proponer estas 5 líneas de investigación sobre las que se acumula la evidencia:

1. El glifosato como disruptor endocrino: la evidencia de disrupción endocrina en anfibios, reptiles y mamíferos es rotunda y cada vez la evidencia de este fenómeno se demuestra a concentraciones más bajas.
2. El glifosato es un estresante general de la fisiología de los vertebrados, produciendo aumentos de temperatura comportamental (en reptiles), pérdidas de peso y otros efectos similares.
3. El glifosato modifica la expresión genética de genes esenciales para el desarrollo embrionario de los vertebrados, produciendo alteraciones del desarrollo y malformaciones.
4. El glifosato es carcinogénico, genotóxico y citotóxico en vertebrados.
5. El glifosato altera la microbiota simbiote de los vertebrados.

El glifosato como disruptor endocrino: la evidencia de disrupción endocrina en anfibios, reptiles y mamíferos es rotunda y cada vez la evidencia de este fenómeno se demuestra a concentraciones más bajas.

El trabajo de Omran & Salama (2013) ya nos había puesto en la pista de que el glifosato podía ser un potencial disruptor endocrino en vertebrados al afectar la síntesis de un enzima esencial en el metabolismo hormonal compartida por invertebrados y vertebrados. Sin embargo, 9 años antes Christina M. Howe *et al.* (2004) ya habían informado de anomalías gonadales tras la exposición al herbicida y que los “niveles de transcripción del ARNm del receptor β de la hormona tiroidea se elevaron por la exposición a formulaciones que contienen glifosato y POEA” en *Rana clamitans*, *R. pipiens*, *R. sylvatica* y *Bufo americanus*. No solamente estaría afectando a la síntesis de las hormonas sexuales, sino que potencialmente estaría afectando a la homeóstasis hormonal a través

de uno de sus nodos: la hormona tiroidea. La hormona tiroidea regula el metabolismo general en los vertebrados. Un mayor nivel de esta hormona le indica a nuestros tejidos que deben consumir más energía. Lo que en términos fisiológicos se expresa como una tasa metabólica superior. Lo que está ocurriendo es que se activa una de las vías que posee el organismo para prepararse ante situaciones de estrés ambiental. La sobreproducción de hormona tiroidea ocurrió a concentraciones relativamente bajas (del orden de 0,8-1,8 mg/L).

Oliveira *et al.* (2007) estudiaron los efectos del glifosato sobre la proteína transportadora StAR¹⁶⁰ en el ánade zulon (o ánade real, *Anas platyrhynchos*). La StAR es una proteína situada en el citosol de las células productoras de esteroides (células de la teca y lúteas de los ovarios, en las células de Leydig de los testículos y en algunos tipos celulares de la corteza suprarrenal¹⁶¹). Funciona como una especie de autobús: carga el colesterol necesario para la síntesis de esteroides y lo transporta dentro de las mitocondrias. Allí le espera una vieja conocida: el citocromo P450. En realidad StAR forma parte de un conjunto de proteínas que ayudan a este tránsito. El aceite no mezcla con el agua. De la misma manera, el colesterol (que es una grasa), no mezcla bien con la fase acuosa celular, que es el citosol. Por eso existen este tipo de proteínas. La cuestión importante reside en que la StAR, ese autobús que decíamos, es la parte limitante del proceso. Si no hay suficientes autobuses, menos viajeros llegan al centro comercial donde se producen las hormonas esteroideas. Los autores demostraron que con un tratamiento de 5mg/Kg de Roundup® se produjo una reducción del 90% de la cantidad total de testosterona en plasma sanguíneo. Además, a nivel tisular, se produjo una reducción leve, pero significativa, de la parte anatómica de los testículos donde se da la producción de espermatozoides (los túbulos seminíferos), así como una alteración más grande de la luz (diámetro) de los mismos.

Romano *et al.* (2010) estudiaron parámetros histológicos similares pero en ratas de laboratorio (*Rattus norvegicus*) de una de las cepas

160 Del inglés *steroidogenic acute regulatory protein*.

161 En breve realizamos una explicación exhaustiva de estos tipos celulares.

tipo más utilizadas (sino la que más): Rata Wistar¹⁶². Observaron que el Roundup Transorb incrementó el peso testicular y suprarrenal a dosis muy elevadas (250 mg/Kg) y fue capaz de aumentar la luz de los túbulos seminíferos y disminuir el epitelio de los mismos de forma significativa en todas las concentraciones estudiadas (5 mg/Kg fue la más baja). También observaron una disminución de la testosterona total en plasma en todas las concentraciones del herbicida y demostraron que se debía a una caída de entre el 30-50% de la producción de la misma.

Como queda claro y evidente en el octavo capítulo, “Constructores de cuerpos” del maravilloso libro *En Tierra fértil* de Peter T. Ellison (2001), el paquete hormonal de machos y hembras en vertebrados terrestres (sobre todo en mamíferos) es, básicamente, similar. Por tanto, no es de extrañar que, tras experimentar con machos y hallar pruebas del potencial disruptor de la fisiología hormonal de vertebrados, los estudios comenzara a arrojar resultados similares en hembras. Veamos alguno de estos estudios.

Todas estas evidencias se ven reforzadas por los trabajos *in vitro* de Émilie Clair *et al.* (2012) y Maria Chiara Perego *et al.* (2016) en células testiculares de ratón y en células ovárica ovinas respectivamente. Clair y sus colegas del CRIIGEN¹⁶³ probaron un amplio espectro de concentraciones sobre las células de Leydig¹⁶⁴ y células de Sertoli¹⁶⁵ de ratón

¹⁶² En partes posteriores del texto veremos que la selección de la cepa de rata a utilizar en un determinado experimento puede ser objeto de un acalorado debate (siempre que existan intereses económicos detrás, claro está, como veremos en el asunto Séralini).

¹⁶³ El CRIIGEN es una ONG dedicada a la investigación de glifosato y otros pesticidas y los efectos deletéreos sobre el ser humano y la biodiversidad. Como veremos en el próximo capítulo, fue objeto de ataques mediáticos en el llamado “asunto Séralini”.

¹⁶⁴ Las células de Leydig son las células encargadas de producción de hormonas esteroideas (testosterona principalmente, pero no solamente) que regulan la producción de gametos en machos de mamíferos. Son homólogas a las células de la teca ovárica de las hembras. Se sitúan entre los túbulos seminíferos, de ahí que también recibían el nombre de células intersticiales del testículo.

¹⁶⁵ Las células de Sertoli son las encargadas de “cuidar” de las células germinales: les dan soporte alimenticio y estructural durante su transformación hacia espermatozoides. Son homólogas a las células de la granulosa.

(entre 1-10000 mg/L) y las trataron durante 48h observando qué ocurría a cada momento. Además, distinguieron en su análisis el Roundup® del glifosato como principio activo. Para indagar sobre los posibles efectos nocivos del herbicida se fijaron en dos indicadores de muerte celular: la presencia de la proteína de membrana adenilato quinasa¹⁶⁶ en los medios de cultivo celular y la presencia de actividad caspasa¹⁶⁷. La presencia o actividad de estas proteínas se vio incrementada en las células tratadas con Roundup® a partir de las 24h de estar, al menos, a concentraciones de 1 g/L, una concentración realmente elevada. Sin embargo, a concentraciones de 1 mg/L se observó una reducción del 35% en la producción de testosterona. Por su parte Perego *et al.* (2016) encontraron resultados similares en células de la granulosa¹⁶⁸, que vieron deteriorada su tasa de proliferación a todas las concentraciones de glifosato molecular que utilizaron (0,5-5 mg/L), así como una reducción de la producción de estradiol a la concentración de 5 mg/L. Esta parte experimental el glifosato se añadía junto con la hormona folículoestimulante¹⁶⁹ (FSH) y el factor de crecimiento IGF1. La producción de

¹⁶⁶ La adenilato quinasa es una proteína de membrana presente en todas las células eucariotas. Cuando se produce la muerte celular, o apoptosis, sea esta inducida o producida por un tóxico, se libera al medio y ha servido tradicionalmente en biología celular como un indicador fiable de este proceso.

¹⁶⁷ Las caspasas son un grupo de proteínas que interviene en la activación de la muerte celular. En vertebrados, casi nunca una célula muere sin más. Es un proceso “reglamentado” a través de diferentes procesos metabólicos en las que proteínas como las caspasas están implicadas. Hay de diferentes tipos y con diferentes actividades (iniciadoras, intermediarias o efectoras, según su función sistémica por ejemplo). En concreto, en este trabajo se mide la actividad de las caspasas 3/7, un complejo de caspasas que, en principio, responde a la activación por parte de los linfocitos T citotóxicos y que, por ejemplo, es esencial para evitar el crecimiento de tumores. Si estos linfocitos detectan una célula precancerosa o cancerosa, pueden intentar activar estas caspasas para “programar” su muerte.

¹⁶⁸ Son las células encargadas de la producción de las hormonas esteroideas en las hembras de mamíferos, así como la producción de factores de crecimiento para el ovocito en maduración. Se sitúan en la periferia del ovocito.

¹⁶⁹ Hormona producida por la hipófisis de forma periódica y que le indica al ovario, en concreto a las células de la granulosa que poseen receptores para esta hormona, cuando iniciar el proceso de producción de estrógenos.

progesterona no se vio afectada. Las células de la teca¹⁷⁰, por su parte, no se vieron afectadas. También encontraron que otros 2 citocromos de la familia P450 implicados en la producción de hormonas esteroideas no veían afectada la expresión de su gen. Cuando añadieron glifosato sin nada más a las células de la granulosa vieron que, a concentraciones de 1,7 mg/L, se elevaba un 11% el número de células tras solamente 24h de exposición. Los autores consideran probada la posibilidad de que el glifosato, de forma directa, influya sobre la función ovárica.

El glifosato es un estresante general de la fisiología de los vertebrados, produciendo aumentos de temperatura comportamental (en reptiles), pérdidas de peso y otros efectos similares a nivel comportamental.

Antes de que acabara de la década de 1980 y, por tanto, antes de que el uso del glifosato se generalizara en el país que primero lo adoptó (Estados Unidos), ya habían trabajos publicados en revistas de prestigio que indicaban que los tratamientos masivos con este herbicida, alteraban el paisaje y la composición de especies vegetales y, por tanto, producían cambios comportamentales en la fauna. En este caso, en la fauna avícola. Éstas, debido al cambio de estructura vegetal y específica del territorio, rehuían regiones antes deseadas por ellas. Santillo *et al.* (1989) demuestran que las localidades tratadas con Roundup® para evitar la regeneración del sotobosque presentan un número significativamente menor de aves cantoras como el pechiamarillo común (*Geothlypis trichas*), el gorrión de Lincoln (*Melospiza lincolnii*) o el papamoscas de aliso (*Empidonax alnorum*). Por su parte Linz *et al.* (1996) demuestran efectos similares para aves que habitan zonas húmedas, como los mirlos de alas rojas (*Agelaius phoeniceus*), los mirlos de cabeza amarilla (*Xanthocephalus xanthocephalus*) y los vernos pantanosos (*Cistothorus palustris*), comprobando además la rápida capacidad de recuperación de estos ecosistemas si se deja de aplicar el herbicida.

Sin embargo, todavía debieron pasar bastantes años antes de que la evidencia sobre los efectos metabólicos y comportamentales más “finos” pudieran detectarse.

¹⁷⁰ Son células encargadas de la producción de los intermediarios necesarios para la síntesis de hormonas esteroideas por parte de las células de la granulosa. Estos “intermediarios” es básicamente testosterona que será convertida en estrógenos en la granulosa. Además, responden a la hormona luteinizante (LH).

Por ejemplo, Dornelles & Oliveira (2016) trabajaron sobre renacuajos de *Lithobates catesbeianus* a concentraciones muy bajas de Roundup Original® (18 µg/L) y descubrieron que, a esta concentración, se producían claros síntomas de estrés fisiológico, como lo son la reducción de las moléculas de reserva energética celular y un incremento del consumo de lípidos como fuente energética, en detrimento de los hidratos de carbono¹⁷¹. También mostraron, por el contrario, un incremento de la concentración de lípidos en los tejidos branquiales. Otro signo de estrés fisiológico lo mostró la disminución del colesterol a nivel muscular y branquial¹⁷². La tesis principal de este trabajo la resumen los autores de la siguiente manera: estas “concentraciones (...) pueden provocar un aumento del gasto energético para mantener la homeostasis y la supervivencia de estos animales”. En la misma línea, aunque utilizando concentraciones mucho más elevadas (144 mg/L, unas 10000 veces superiores), Joanna K. Carpenter *et al.* (2016) utilizaron Agpro Glyphosate 360® y Yates Roundup Weedkille® y comprobaron que se producía una pérdida espectacular de masa corporal y un incremento notable en el comportamiento de búsqueda de calor solar en el lacértido *Oligosoma polychroma*. El grupo de investigación postula que el incremento en la frecuencia del comportamiento de búsqueda de homeostasis térmica solar “podría ser una respuesta a la fiebre para aumentar el metabolismo y así contrarrestar el estrés fisiológico”.

Abundando más en ello, y poniendo el foco también en la capacidad disruptora endocrina, Mariailaria Verderame & Rosaria Scudiero (2019) trabajaron sobre la lagartija italiana *Podarcis siculus*. Para las autoras es

¹⁷¹ La forma que tienen las células animales de almacenar los hidratos de carbono simples es en forma de glucógeno, un hidrato de carbono complejo análogo al almidón de las plantas. Otra forma de almacén energético que tienen las células animales son los triglicéridos. Tanto éstos como el glucógeno vieron disminuida su concentración a nivel celular en *Lithobates catesbeianus* tras la aplicación de Roundup Original® a muy bajas concentraciones.

¹⁷² El colesterol es de suma importancia para la fluidez de la membrana plasmática de las células y es utilizado como ladrillo básico para la síntesis de hormonas esteroideas (como las hormonales), críticas para la homeostasis corporal. Que se reduzca significativamente en dos tejidos tan activos como el músculo o las branquias nos está indicando algún tipo de desregulación y/o daño celular.

esencial comprender si el herbicida más utilizado del mundo puede afectar de alguna manera a los lacértidos porque, “*como insectívoros vertebrados, los lagartos protegen a las plantas de los insectos herbívoros, aumentando la biomasa vegetal a través de la pirámide trófica y representan un vínculo importante entre los invertebrados y los depredadores superiores*”. Esta mirada holística es la que debiera tomarse en los procesos de evaluación de cualquier nueva sustancia. Probaron dos concentraciones muy bajas: 0.05 y 0.5 µg/Kg, administradas oralmente en días alternos durante 3 semanas. Los resultados demostraron que ambas dosis son tóxicas para el hígado de estas lagartijas, que presentó claros signos de sufrimiento, independientemente del sexo: se produjo un incremento significativo de la presencia de zonas fibrosas y, además, una pérdida de función fisiológica¹⁷³. También observaron que, a estas concentraciones, se producía una regulación positiva del receptor de estrógeno α: una misma cantidad de estrógeno ahora podría estimular más la misma célula hepática. O lo que es lo mismo, el glifosato estaba actuando como disruptor endocrino. Además, también produjo un incremento en la expresión del gen de la vitelogenina, una proteína esencial para el transporte de proteínas y lípidos desde el hígado hasta los ovocitos en formación, ayudando así a formar la “yema” del huevo. Su incremento en sangre es un reconocido indicador de exposición a estrógenos.

¹⁷³ El incremento de zonas fibrosas en el hígado es la respuesta habitual de este órgano ante situaciones de estrés fisiológico. Por ejemplo, al intentar detoxificar el alcohol, un hígado de mamífero en primer lugar intenta gracias a la acción de varias enzimas, romper la molécula. El resultado es, entre otras cosas, moléculas de acetaldehído (un conocido carcinogénico) y acetato. Estas moléculas son metabolizables por el organismo, pero tienen un elevado poder calórico. El alcohol no alimenta (“calorías vacías”), pero estos compuestos terminarán formando parte de ácidos grasos que se almacenarán *in situ*. Muchos procesos de detoxificación acaban así: moléculas pequeñas metabolizables que acaban formando parte de lípidos. Como el hígado no puede deshacerse de todos ellos, y además está siendo atacado por compuestos tóxicos en el proceso (hay un evidente efecto inflamatorio), acaban almacenándose muchos de estos lípidos en forma de gotículas dentro de las células. Es lo que se conoce como esteatosis hepática o hígado graso. Si el proceso de estrés fisiológico sigue, las células mueren, formándose cicatrices en el hígado o “zonas fibrosas”. Es lo que se conoce como cirrosis hepática. Esta zona de hígado ya no es regenerable. Si una proporción crítica de hígado alcanza este estado, la vida es imposible.

Pero volvamos a la biología del comportamiento. Rick A. Relyea del departamento de ciencias biológicas de la Universidad de Pittsburgh (Pensilvania, EE.UU) estudió en 2012 qué ocurría en un microcosmos que simulaba una pequeña laguna cuando se adicionaba Roundup Original MAX® en concentraciones equivalentes a entre 0-3 mg/L de glifosato. Dentro del microcosmos habitaban renacuajos de tres especies de anfibios: *Rana sylvatica*, *Rana pipiens* y *Bufo americanus*. Además de añadir herbicida, el experimento introdujo la variable “depredador”. En uno de los grupos de microcosmos se incorporaron tritones adultos de la especie *Notophthalmus viridescens* o larvas de la libélula *Anax junius*. Ambos organismos depredan activamente renacuajos de anfibios. La presencia de depredadores paradójicamente redujo la mortalidad con respecto a su ausencia de depredadores estando ambos conjuntos de microcosmos bajo la acción del glifosato. ¿Qué estaba pasando?

Para el autor, esto se debió probablemente a la estratificación en la columna de agua del glifosato: los depredadores inducen comportamientos de escape hacia el bentos de la charca y así, de forma colateral, se salvan de la acción del glifosato. Además, estas concentraciones modificaron la morfología caudal de los renacuajos induciendo formas similares a las que son inducidas por el estrés producido ante la presencia de depredadores: colas más profundas y con un giro final más acusado.

El glifosato modifica la expresión genética de genes esenciales para el desarrollo embrionario de los vertebrados, produciendo alteraciones y malformaciones.

Xenopus laevis es una rana africana que ha sido muy utilizada en biología del desarrollo como organismo modelo. Gracias a estudios sobre este anfibio, conocemos cómo se desarrolla embrionariamente el ojo de los vertebrados, por ejemplo. Este conocimiento que se posee sobre su desarrollo embrionario permite conocer mejor cualquier alteración que se produzca en el mismo.

Alejandra Paganelli *et al.* (2010) utilizaron concentraciones 1/3000-1/5000 de Roundup Classic® (que contiene 48 g/L de la sal de glifosato) y glifosato puro. Esto es equivalente a “tratamientos” de 16 mg/L y 9,6 mg/L. Además compararon los resultados obtenidos en estos embriones de *Xenopus* con embriones de pollo (gallina doméstica *Gallus gallus*) a los que aplicaron “tratamientos” de 13,7 mg/L y 10,7 mg/L. Los

principales resultados del estudio son demoledores. Esta preparación comercial en base a glifosato (que contiene también surfactante, por tanto) produjo embriones “*muy anormales con marcadas alteraciones en el desarrollo de la cresta neural y cefálica y acortamiento del eje anteroposterior*”.

La cresta neural es una formación de tejido embrionario que da origen en vertebrados, entre otros órganos, al sistema nervioso central. La cresta cefálica, por su parte, da origen a los ojos y los oídos, entre otros órganos. Así que nos hacemos una idea de la importancia de estas alteraciones. Observaron, además, que los cambios en los indicadores moleculares utilizados para medir el desarrollo embrionario de la cresta neural correlacionaron positivamente con deformidades en los cartílagos craneales. Este resultado se reprodujo con el uso del glifosato puro y con la administración de Roundup Classic® en embriones de pollo: microcefalia, reducción del tamaño de las vesículas ópticas¹⁷⁴ y una pérdida gradual de rombómeros¹⁷⁵.

Posteriormente a esta experimento, Paganelli *et al.* (2010) realizaron lo que se denominan “experimentos de rescate”. El equipo de investigación tiene una hipótesis sobre qué mecanismo molecular subyacente produce los efectos observados. En este caso, la hipótesis es que el ácido retinoico está jugando un papel esencial. El ácido retinoico, o retinol, es una importante molécula reguladora de la expresión génica durante el desarrollo embrionario en vertebrados: está implicada en el control de la proliferación y especialización celular y en la formación de patrones de simetría bilateral. En concreto, se ha probado su importancia en el control de la expresión de los genes *hox*¹⁷⁶ en el encéfalo en desarrollo.

¹⁷⁴ Las vesículas ópticas son las estructuras embrionarias que darán origen a los ojos.

¹⁷⁵ La parte posterior del cerebro está segmentada de manera transitoria, durante el desarrollo embrionario, al lo largo del eje anteroposterior en diferentes compartimentos que reciben el nombre de rombómeros. Este patrón segmentado es esencial para la formación de los nervios craneales y para la formación del Sistema de Activación Reticular Ascendente (SARA), que interviene en el estado de vigilia. Toda esta región del encéfalo se denomina robencéfalo.

¹⁷⁶ En concreto observaron qué ocurría con el gen Sonic hedgehog (Shh) que es una proteína que interactúa con muchos genes *hox* y otras proteínas durante el desarrollo embrionario y, entre otras cuestiones esenciales, interviene en el establecimiento del eje corporal, en el desarrollo neuronal, en el desarrollo de las extremidades, en el crecimiento de los dientes (y plumas en las aves) o en el desarrollo de las vísceras (intestino y páncreas). Es muy fácil comprender que un desajuste en su actividad puede acarrear múltiples errores de desarrollo. A continuación explicaremos qué son los genes *hox*

Ya habían revisado que el aumento en la expresión del ácido retinoico en embriones de *Xenopus* producía patrones de desarrollo embrionario anormal similares a los que produce el glifosato y las formulaciones comerciales del mismo. Así que, si su hipótesis era correcta y el retinol tenía algo que ver en todo esto, utilizando un antagonista del mismo y bajando su expresión observarían otra vez desarrollos embrionarios normales. Y así ocurrió. Además, esto se vio reforzado por la constatación empírica de que los genes *hox* estudiados volvían a expresarse dentro de los márgenes de la normalidad. Una de las reflexiones de los autores con las que nos quedamos, tras estas constataciones es que “*el efecto directo del glifosato sobre los mecanismos tempranos de morfogénesis en embriones de vertebrados genera preocupación sobre los hallazgos clínicos de la descendencia humana en poblaciones expuestas a herbicidas en campos agrícolas*”.

Pero este tipo de estudios ya se habían realizado anteriormente, solo que gracias a él tenemos un posible mecanismo de acción mediante el cual el glifosato estaría actuando y, por tanto, una línea de investigación sobre la que indagar más. Lajmanovich *et al.* (2003) trabajaron con renacuajos de *Scinax nasicus*, una rana sudamericana muy común en campos de cultivo y zonas húmedas anexas. Realizaron exposiciones de 24-96h a concentraciones de entre 3.07-7,5 mg/L. La mortalidad de los renacuajos comenzó a incrementarse a partir de 3,84 mg/L y tras 48h. El aumento de la mortalidad fue dependiente de la concentración. La tasa de malformaciones observada también. Su presencia era del 90% en el tratamiento a la concentración más alta, pero la frecuencia era significativamente más elevada a todas las concentraciones probadas. Entre las malformaciones detectadas estaban: defectos maxilares, craneales y colas curvadas por su parte ventral.

En ya citado Howe *et al.* (2004), los autores ampliaron el estudio del desarrollo embrionario a los renacuajos de 3 ranas y un sapo norteamericanos (*Rana clamitans*, *R. pipiens*, *R. sylvatica* y *Bufo americanus*), testeando los preparados comerciales que contienen POEA y aquellos que contienen surfactante desconocido, además de practicar tratamientos con glifosato puro. Concluyen que “*los renacuajos de Rana pipiens expuestos crónicamente a concentraciones ambientalmente relevantes de*

POEA o formulaciones de glifosato que contienen POEA mostraron una disminución de la longitud del hocico-cloaca [eje anteroposterior] en la metamorfosis y un mayor tiempo hasta la metamorfosis, daño en la cola y anomalías gonadales (...)”. La hipótesis que manejan en este caso (ya la hemos comentado) es que los problemas del desarrollo, de retraso de la metamorfosis y de malformación gonadal pueden deberse a los efectos sobre la transcripción que han observado en algunos de los genes que conforman el receptor de membrana de la hormona tiroidea tan esencial en anfibios para realizar la metamorfosis.

Por su parte, Sparling *et al.* (2006) trabajaron con embriones de la tortuga galápagos *Trachemys scripta elegans*, la preparación comercial en base a glifosato Glypro® y el surfactante LI700. Afirman sus autores que “*que el glifosato tuvo varios efectos subletales en embriones y crías de tortugas de orejas rojas y que la combinación de altas concentraciones de glifosato y LI700 puede ser letal*”. Entre ellos destacan el daño en el ADN, el menor tamaño de las crías al nacer, el menor porcentaje de éxito en la eclosión de los huevos o la disminución en la habilidad de las tortugas al darse la vuelta (que podría estar indicando lesiones de tipo neurológico).

Las malformaciones en embriones nos retrotraen a figuras idealizadas como la del profesional de la medicina apasionado del coleccionismo de extrañas aberraciones que guarda con sumo cuidado en frascos de formol. También estimulan nuestra creatividad: ¿cuántas novelas de ciencia ficción se habrán escrito tras visualizar uno de estos frascos con un espécimen especialmente llamativo? El biólogo evolutivo Richard Goldschmidt debió pasar muchas horas en lugares de intenso olor a formalina porque, en 1940 escribió “*la base material de la evolución*”, un libro en el que criticaba el reduccionismo de la teoría sintética de la evolución¹⁷⁷, que se estaba fraguando como el consenso evolutivo

¹⁷⁷ La teoría sintética de la evolución es el consenso científico conseguido a mediados de la década de 1950 gracias a las obras de diversos autores que daban una explicación coherente y plausible a cómo había evolucionado la vida en el planeta tierra. Sus pilares son el cambio gradual de las formas biológicas, la mutación como forma primordial de variabilidad dentro y entre especies, la selección natural como mecanismo causal principal del cambio biológico y la extrapolación de estos mecanismos hacia el pasado remoto como explicación del registro fósil.

durante esa década. La criticaba, decía, por su inoperancia a la hora de explicar la macroevolución¹⁷⁸. ¿Cómo unos cambios en las frecuencias de unos cuantos alelos en una población podía explicar aquello que el registro fósil mostraba como grandes transiciones morfológicas en cortos espacios de tiempo geológico? Su hipótesis fue la del “monstruo prometedor”. Un individuo (unos pocos si se quiere) en el cual, debido a la aparición conjunta de grandes cambios en su material genético, aparecerían grandes cambios morfológicos con respecto a sus progenitores. Una forma de evolución rápida que fue radicalmente rechazada.

Sin embargo, la disciplina de la biología evolutiva ha cambiado mucho desde Goldschmidt y los *popes* de la teoría sintética. Subdisciplinas como la “evo-devo” o la “eco-evo-devo”¹⁷⁹ se abren paso como formas más holísticas de comprensión del complejo sistema de la vida en interacción con los ecosistemas y la comprensión de lo que ocurre durante el desarrollo embrionario. Ninguno de los descubrimientos

¹⁷⁸ La macroevolución es un concepto que busca establecer una distinción analítica frente al de microevolución. No es lo mismo establecer un mecanismo causal para explicar cómo en unas pocas décadas una determinada especie de mariposa cambia, por ejemplo, las frecuencias relativas en la pigmentación de las escamas de unas alas (es el caso del llamado “melanismo industrial” de la polilla *Biston betularia*, especie cuyas frecuencias poblacionales cambiaron rápidamente de tonalidades blancas miméticas con las cortezas de los árboles repletos de líquenes, es decir tonos grisáceos, hacia tonos negros/oscuros miméticos con los troncos de los árboles ennegrecidos por el hollín del carbón), que explicar las diferencias morfológicas entre mariposas y arañas. La diferencia de magnitud temporal, según esta distinción analítica, hace que el mecanismo causal no tenga por qué ser el mismo.

¹⁷⁹ Estas etiquetas definen armazones conceptuales, teóricos y empíricos que buscan los lazos conectores entre el desarrollo embrionario, lo que éste nos cuenta sobre cómo funciona un sistema en desarrollo, y la teoría de la evolución y cómo ésta debe explicar, por ejemplo, la existencia de genes rectores del desarrollo embrionario, tremendamente conservados a lo largo de la evolución animal (genes *hox*) y comunes a todos los grupos conocidos (evo-devo). También buscan la conexión existente el sistema biológico en desarrollo y el ecosistema donde éste se desarrolla y vive (eco-evo-devo). Estas disciplinas intentan acoplar los nuevos conocimientos sobre modulación de la expresión génica a través de mecanismos no genéticos (epigenética, por ejemplo) capaces de heredarse una vez adquiridos (lamarckismo) y otras modulaciones que adaptan los organismos a los ecosistemas.

actuales ha llegado a dar visos de veracidad a la radical hipótesis del “monstruo prometedor”, pero sí que los conocimientos que tenemos actualmente nos permiten afirmar que, mediante pequeños cambios en la regulación de los genes centrales del desarrollo (genes *hox*¹⁸⁰) se producen cambios enormes en el fenotipo externo. No hace falta ni siquiera cambios genéticos. Esto lo ha mostrado bien Richard C. Francis en su “*En manos humanas*” donde explica la evolución de la domesticación de animales y como, sin apenas cambios genéticos (por ejemplo en el gen que expresa la hormona del crecimiento), sino a través de cambios regulacionales (promotores del gen de la hormona del crecimiento) o cambios regulacionales sobre genes *hox* y *homeobox*, como el gen *Sonic hedgehog* (Shh), producen grandes “saltos morfológicos”. ¿Es el glifosato el monstruo prometedor de Goldschmidt?

El glifosato es carcinogénico, genotóxico y citotóxico en vertebrados.

Como en el clásico de la literatura inglesa, “*El Extraño caso del Dr. Jekyll y Mr. Hyde*”, cada vez que se investigan un poco más las capacidades deletéreas del glifosato y sus preparados comerciales, Hyde se hace más y más con la personalidad del doctor Jekyll. Como en las otras líneas de investigación, los primeros estudios que demuestran efectos sobre el ADN, o sobre los sistemas de control del ciclo celular, se realizaron a concentraciones muy elevadas. Sin relevancia medioambiental. Sin embargo, también como en las otras líneas de investigación, estas

¹⁸⁰ Los genes *hox* forman parte de un conjunto más amplio de genes que actúan en los primeros momentos del desarrollo de un animal y que, en su caso, organizan el eje anteroposterior del mismo. Básicamente su expresión le dice al resto de genes que esa porción del cuerpo va a ser la cabeza, el tronco o la cola y, en consecuencia, se expresará un determinado conjunto de genes, u otro, actuando también de formas distintas en cada caso (explicado de forma muy somera). Lo importante es que son tan centrales en el desarrollo que la expresión de un determinado gen *hox* en un lugar equivocado puede hacer que el animal acabe produciendo, por ejemplo, una pata en la cabeza. Hemos visto que Paganelli *et al.* (2010) han demostrado la interacción entre estos genes, y otros, durante el desarrollo embrionario con el glifosato a través de la desregulación de la acción del ácido retinoico. De hecho, hay abundante bibliografía sobre los peligros que afrontan las mujeres embarazadas si tratan su acné con isotretinoína, un retinoide sintético (Tejerizo-López *et al.*, 2003).

evidencias lo que hacen es abrir la puerta a nuevos estudios y nuevas hipótesis que, tras unos años, encuentran evidencias. Ésta vez ya, a concentraciones medioambientalmente relevantes.

Por ejemplo, podemos visitar el trabajo de Eliane Dallegrave *et al.* (2003) donde trabajaron con ratas wistar, Roundup® y concentraciones del mismo muy elevadas, que oscilaron entre los 500-1000 mg/Kg. Se les administró esta dosis durante una semana a hembras embarazadas (del día 6 al día 15 de embarazo) y, posteriormente, se observó qué ocurría en su descendencia. Todos los tratamientos tuvieron un incremento de anomalías esqueléticas con respecto al control. Los 500 mg/Kg duplicaron las anomalías observadas en el control; los 750 mg/Kg las triplicaron; y los 1000 mg/Kg las cuadruplicaron. Por su parte, Benedetti *et al.* (2004) estudiaron la citotoxicidad del preparado comercial Biocarb®, también en ratas wistar, y poniendo el foco en el hígado. Las concentraciones que utilizaron estuvieron entre 4,87-487 mg/Kg y los “tratamientos” duraron 75 días, administrando la dosis cada dos días, intentando así simular una exposición crónica al herbicida. Desde la concentración más baja se observó una “fuga” de enzimas intracelulares hepáticas, detectada en plasma sanguíneo, que sugería que se estaba produciendo un daño irreversible en las células hepáticas. A nivel histológico, y a las concentraciones más elevadas, observaron un incremento de los macrófagos hepáticos (células de Kupffer¹⁸¹) dentro de los vasos sanguíneos del hígado y un incremento de los acúmulos de fibras de reticulina. En otras palabras, el hígado estaba sufriendo un proceso inflamatorio, con lesiones tisulares que acabarían formando zonas fibrosas no funcionales.

¹⁸¹ Para hacer constar la importancia de estas células, aquí Clària y Titos (2004) las retratan de la siguiente manera: “*las células de Kupffer constituyen uno de los tipos celulares hepáticos, en términos de metabolismo y función, más activos. Así, estos macrófagos son los principales productores en el hígado de citocinas, factores de crecimiento y mediadores biológicamente activos. Las células de Kupffer ejercen funciones vitales para el organismo tales como la eliminación de sustancias extrañas y la regulación de la respuesta inflamatoria e inmunitaria. Las células de Kupffer desempeñan también un papel fisiopatológico destacado en el daño hepático por endotoxina o alcohol y en la patogénesis de la inflamación y fibrosis hepática*”.

Nahla S. El-Shenawy *et al.* (2009) realizaron un trabajo más completo a la hora de indagar sobre la citotoxicidad del glifosato. Utilizaron todavía concentraciones elevadas (Roundup® a una concentración de 269.9 mg/Kg o glifosato molecular a 134.95 mg/Kg) con administración de la dosis (vía intraperitoneal) cada dos días y durante un periodo de dos semanas sobre ratas albinas macho. También pusieron el foco en el hígado. Replicaron los hallazgos sobre la “fuga” en sangre de enzimas intracelulares hepáticas. Esto ocurrió ya a partir de la primera semana de exposición, tanto para el Roundup®, como para el glifosato puro. Observaron además un descenso significativo del glutatión¹⁸² que fue claramente dependiente del tiempo de exposición al herbicida y una inducción del estrés oxidativo al detectarse un incremento de la peroxidación lipídica¹⁸³. Ambos tratamientos también incrementaron los niveles del factor de necrosis tumoral, una citoquina que interviene en los procesos inflamatorios y de apoptosis.

Desde otro enfoque, Jasmine George *et al.* (2010) estudiaron qué ocurría con la aplicación tópica de 25 mg/Kg de glifosato y si su efecto se parecían a dos conocidos cancerígenos: 12-tetradecanoilforbol-13-acetato (TPA) y el 7, 12-dimetil-benzantraceno (DMBA). Ambos suelen utilizarse como controles positivos en muchos experimentos de carcinogenicidad. Estudiaron un perfil de nueve proteínas con expresión alterada en ratones tratados con TPA y que tiene un papel esencial en varios procesos clave como la apoptosis y la inhibición del crecimiento o las respuestas antioxidantes. El glifosato aplicado 3 veces por semana en la piel de ratones a la concentración de 25 mg/Kg y, durante un periodo de dos semanas, produjo un patrón de expresión similar en estas nueve proteínas en el TPA y en el glifosato.

¹⁸² El glutatión es uno de los principales antioxidantes internos que poseen los mamíferos y tiene como una de sus funciones unirse a especies reactivas de oxígeno (como el superóxido O_3^{-2} , H_2O_2 y otras) y neutralizarlas. También es un transportador intracelular de coenzimas y, a nivel extracelular, ayuda al funcionamiento del sistema inmune.

¹⁸³ La peroxidación lipídica es el proceso mediante el cual los lípidos poliinsaturados son catabolizados, destruidos, degradados para obtener energía. El problema es que intervienen en él especies reactivas del oxígeno, para capturar los electrones liberados durante el catabolismo. Si este proceso es excesivamente utilizado, los radicales libres pueden “descontrolarse” y producir daños múltiples en la célula.

Katarína Šiviková y Ján Dianovský, de la Universidad de medicina veterinaria de Košice (Eslovaquia) indagaron sobre el poder citotóxico del glifosato en linfocitos de vaca. Tras la extracción de los linfocitos de los animales, éstos se cultivaron y se sometieron a dosis que oscilaron entre ellos 0,165 mg/L y los 5,3 mg/L. Observaron efectos citotóxicos a partir de 0,331 mg/L. Las concentraciones más elevadas (a partir de 2,65 mg/L) causaron una reducción significativa de la mitosis y, por tanto, de la tasa de proliferación celular. Además, buscaron si se estaban produciendo aberraciones cromosómicas e intercambios entre cromátidas hermanas. Encontraron que ambos indicadores de genotoxicidad y citotoxicidad se produjeron, siendo más frecuentes los intercambios entre cromátidas hermanas.

Hay otros dos estudios que se van a mencionar. Están realizados en reptiles y evalúan la genotoxicidad del glifosato a través de, primero, la exposición embrionaria al herbicida y, segundo, el posterior análisis de los hematíes del animal¹⁸⁴. Gisela Laura Poletta *et al.* (2009) trabajaron con huevos del caimán *Caiman latirostris* a los cuales sometieron a tratamientos de entre 0,05-17,59 mg/huevo de Roundup®. Observaron daños en el ADN de los eritrocitos a partir de 0,5 mg/huevo. Hicieron dos análisis que es bueno explicar un poco más en detalle para que conozcamos realmente de qué hablamos cuando los trabajos científicos comienzan a acumular evidencia de genotoxicidad y citotoxicidad del glifosato. Utilizaron lo que se denomina “ensayo de micronúcleos”. Este es un ensayo tecnológicamente accesible y universalmente validado para detectar “inestabilidad genética” en el ADN porque detecta porci-

¹⁸⁴ Esto quizá pueda llamarte la atención. Si, los eritrocitos de la mayor parte de vertebrados tienen ADN. De hecho, tienen núcleo. Los raros somos los mamíferos que, en algún momento de nuestra evolución, optamos por unos “sacos” enucleados llenos de hemoglobina. Tanto los nucleados, como los enucleados, los denominamos glóbulos rojos, eritrocitos o hematíes. La principal hipótesis sobre por qué esto es así en mamíferos propone que sería realmente una adaptación: los glóbulos rojos enucleados permiten contener una mayor cantidad de hemoglobina y, por ende, una “mejora” metabólica potencial al permitir un mayor transporte de oxígeno. Sin embargo, los camélidos también poseen núcleo en sus hematíes lo que deja a cualquier explicación funcionalista ante un difícil panorama.

ones de material genético incorrectamente incorporadas a los núcleos tras la división celular (esto es lo que es básicamente un “micronúcleo”). Su conteo puede hacerse automáticamente o de forma manual con diferentes tipos de microscopía y/o citómetros de flujo¹⁸⁵. A partir de 0,5 mg/huevo este grupo de investigación detectó inestabilidad genética significativa. También utilizaron el “ensayo cometa” (comet assay) que evalúa la integridad del ADN a través de la diferente velocidad de migración del ácido desoxirribonucleico en un medio de agarosa en función de su tamaño. Cuanto más pequeño más rápido migra. Esto hace fácilmente visible un ADN dañado en múltiples fragmentos. Estos fragmentos “correrán” por el gel de agarosa, produciendo un rastro que no proporcionara un ADN íntegro¹⁸⁶. Aquí también detectó el equipo de investigación daños en el ADN a partir de 0,5 mg/huevo.

Laura G. Schaumburg *et al.* (2016) trabajaron con la especie de la-cértido oriunda del cono sur americano, *Salvator merianae*, sobre cuyo huevos aplicaron concentraciones de Roundup® de entre 0,05-1,6 mg/huevo (del orden de 10-20 veces menos que en el anterior trabajo). Las herramientas de análisis de la estabilidad genética y del daño genético fueron las mismas. Detectaron con el análisis micronúcleos y el ensayo cometa daño en el ADN a partir de 0,1 mg/huevo.

El glifosato altera la microbiota simbiote de los vertebrados.

En 2006 un trabajo encabezado por Turnbaugh, y sus colegas del Centro de ciencias genómicas de la Universidad de Washington (EE.UU.), demostró que había una extraña correlación entre la obesidad en ratones y la simplificación de la microbiota intestinal. Los ratones obesos poseían en la parte distal de sus intestinos una mayor proporción de bacterias eficientes en la transformación de la materia orgánica en energía. Con respecto a los ratones no obesos, éstos poseían una diferente proporción en los dos grupos de bacterias predominantes en el tracto digestivo de vertebrados: Bacteroidetes y las Firmicutes. En general, observaron que la proporción de Bacteroidetes aumentaba mientras

185 En Zalacain *et al.* (2005) se puede encontrar en castellano una revisión completa sobre la técnica.

186 En Rodríguez-Rey *et al.* (2016) se puede encontrar en castellano una revisión completa sobre la técnica.

que la de Firmicutes disminuía. Además comprobaron que esta característica era “transmisible”: los ratones que habían sido despojados de su biota intestinal y eran “trasplantados” con microbiota de ratones obesos, comenzaron a acumular grasa. El estudio sobre diversidad de la microbiota se repitió en humanos y se observó el mismo patrón: los humanos con obesidad presentaban una microbiota intestinal simplificada en la cual el grupo bacteriano Bacteroidetes se hacía dominante.

Doce años después, Mao *et al.* (2018) trabajaron en Ratas Sprague Dawley¹⁸⁷ y estudiaron su microbiota intestinal tras su exposición a Roundup® y glifosato puro. Aplicaron el herbicida durante la gestación de estas Sprague Dawley y observaron qué ocurría con la microbiota de sus crías. ¿Utilizaron dosis elevadas? Nada más lejos de la realidad. Cogieron como referencia la dosis máxima recomendada recibida mediante los alimentos (o ADI, “Acceptable Daily Intake”, por sus siglas en inglés) definida como 1,75mg/Kg de peso corporal, según la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Sus resultados fueron perturbadores. Observaron cambios significativos en la microbiota de las crías, especialmente durante la fase de maduración correspondiente en humanos a la pre-pubertad: los grupos de bacterias Bacteroidetes se hacían dominantes frente a los Firmicutes. Si. Efectivamente: tanto el glifosato como el Roundup produjeron patrones microbianos intestinales similares a los patrones presentes en la obesidad.

¿Por qué es esta pérdida de diversidad de la microbiota intestinal es un elemento esencial de la vida, salud y del éxito reproductivo en organismos heterótrofos? Hay, al menos, dos razones para Shreiner, *et al.* (2015): I) la elevada diversidad de la microbiota intestinal permite acceder a componentes de la dieta que una microbiota simple no proporciona, y II) existe una interacción constante entre la microbiota intestinal y el sistema inmune del organismo que la alberga. Una simplificación de esta microbiota llevaría a alteraciones inmunes y nutricionales. ¿Cómo? Veámoslo con algo más en detalle.

187 Al igual que la rata Wistar, esta cepa es ampliamente utilizada en investigación. Fue creada en 1925 por las granjas Sprague-Dawley. De hecho, Wistar y Sprague Dawley son las dos cepas más utilizadas en Europa y EE.UU.

Los xiloglicanos son unos polímeros de glucosa bastante complejos y difíciles de digerir ¿A quien no le ha dado nunca gases la lechuga? Es un alimento que contiene una gran cantidad de estos hidratos de carbono. Los bacteroidetes, por lo general, odian estas moléculas tan complicadas. Sin embargo, existen algunas especies de bacterias del grupo de las firmicutes y de otros grupos que sí que son capaces de atacar estas moléculas e, incluso, hay especies bacterianas que se han especializado en ellas. Este grupo de bacterias especialistas en xiloglicanos son muy escasas en los intestinos de los habitantes de los países ricos. No se come la fibra suficiente. El ser humano que no posea una de estas bacterias en su intestino lo pasa realmente mal cuando ingieren verduras ricas en xiloglicanos debido a que el resto de bacterias que son capaces de metabolizar estas moléculas (pero no son especialistas), lo hacen con digestiones parciales de las mismas (sobre todo a través de la fermentación) que, como resultado final, tienen la liberación de mucho CO₂.

Los firmicutes y otros grupos bacterianos son también capaces de atacar la celulosa y otras fibras vegetales no digeribles, liberando en el proceso "SCFAs" o ácidos grasos de cadena corta. Estos ácidos grasos son una fuente de energía esencial para la mucosa intestinal y se ha demostrado que modulan la respuesta inmunitaria a nivel intestinal y previenen los tumores intestinales: por ejemplo, la microbiota intestinal es capaz de promover la diferenciación y maduración de Linfocitos T reguladores que estarían implicados en procesos antiinflamatorios. Una microbiota simplificada produce, por contra, un aumento de enfermedades autoinmunes e inflamatorias, de ciertos tumores y otros desarreglos en la salud. Otro grupo de seres humanos que tiene desarreglos en su microbiota son las personas con trastorno del espectro autista. En general, son personas cuyas apetencias alimentarias son bastante restringidas. Esto produce microbiotas simplificadas. Se ha demostrado también que este grupo de personas tiende a sufrir en mayor proporción enfermedades autoinmunes¹⁸⁸.

Ya hemos visto que no solamente en vertebrados el microbioma es importante y hemos desgranado parte de la evidencia que demuestra

¹⁸⁸ Ver, por ejemplo, la revisión de Veronica R. Villarreal *et al.* (2024) sobre el asunto.

los efectos del glifosato sobre las diferentes comunidades de bacterias y en seguida vamos a ver qué importante es esto para otros animales terrestres e, indirectamente, también para estos animales terrestres que son capaces de escribir.

Polinizadores y el glifosato como una parte de importante del gran problema ecológico que afrontamos

Veintisiete años. Imagina que ya no eres un urbanita¹⁸⁹ y que, en realidad, naciste en una pequeña localidad rural. Como es habitual, los pequeños municipios todavía conservan esa pequeña faja de cultivo de regadío (más o menos grande) alrededor de la zona urbanizada y que se va convirtiendo en zonas más boscosas, con mayor o menor proporción de pastos, sotobosque, campos de cultivo de secano, caminos y alguna explotación ganadera. Imagina que creciste en un lugar como este y que, tras pasar una infancia en pleno contacto con la naturaleza, deseas escapar de algo así (ya sea por necesidad o por gusto). Viajas hacia un gran centro urbano para proseguir tus estudios, buscarte la vida trabajando y, por una vía o por otra, te quedas allí a vivir y pasan veintisiete años. En todo ese tiempo no habías vuelto a tu lugar de nacimiento. Ahora sí que eres ya un urbanita de pleno derecho. Has vivido ya más tiempo rodeado de asfalto y cemento, que de árboles y bichos. Sin embargo, no sabes porqué pero la vida urbana deja de tener atractivo. Salir a tomar algo o ir de compras se convierten en rutinas. Cada vez piensas más en volver a tu lugar de nacimiento. Recuerdas con ternura tu infancia y comienzas a darle mucha más importancia a las relaciones

¹⁸⁹ Si estás leyendo este libro en Europa, tienes una probabilidad del 76% de estar leyéndolo desde un núcleo urbano relativamente grande. La probabilidad es todavía más grande si lo haces desde el continente americano. Para la porción norte del mismo hay una probabilidad de 83% de que vivas en una ciudad y un poco menor, del 81%, para la parte sur del mismo. La única región del planeta en la que es más probable leer este libro desde una zona rural que una zona urbana es el África subsahariana, con un porcentaje de habitantes en lo rural del 57%.

con las personas y el medio natural que a los supuestos servicios que ofrece un centro urbano. No sabes muy bien de qué vas a vivir allí. Quizá puedas “montarte” algo. Decides arriesgarte. Has conseguido convencer a la gente que más quieres de que merece la pena el cambio.

Tras un largo viaje, allí estas de nuevo. Inspiras el aire fresco y seco y, todavía cegado por la intensidad de la luz del sol, repasas los tejados de las casas de tus antiguos vecinos. Casi todo sigue igual. Los cuatro terrenientes del pueblo habían agrandado y modernizado sus casas de una forma que buscaba imitar las casa de las urbanizaciones más exclusivas de los grandes centros urbanos, pero no lograban despegarse del aire rural. Lo único que conseguían era hacer perder armonía al conjunto del municipio porque el resto de vecinos no había cambiado sus casas. Pero, hay algo raro en el ambiente. Es primavera avanzada y, a estas alturas, la vid debería estar llena de avispa y las dalias del jardín solían zumbar en estas fechas debido a las decenas de abejorros que las visitaban. La planta tiene pocas flores y ni un solo abejorro dispuesto a libar su néctar.

Descargas las bártulos del viaje y comunicas que vas a dar una pequeña vuelta por el camino que sal justo frente a la puerta de tu casa de la infancia. Necesitas volver a notar tierra bajo tus pies. Sin embargo siguen sin cuadrar las cosas. Del “abril pajaril” que solía decir tu abuelo poco queda y las mariposas que también solían revolotear los pastos comunales se han reducido notablemente. Ya por la noche, te sorprende comprobar que esa habladuría que circulaba por las calles urbanas era cierta: las luciérnagas ya no se ven. Y la orquesta de grillos con la que te solías dormir en tu primaveral infancia se han transformado en un solitario grillo que consigue sobrevivir gracias a la humedad del jardín de la casa de tus vecinos. ¿Qué ha pasado?

Este pequeño texto busca ilustrar, quizá de una forma algo patética (lo reconozco) que, según Hallmann *et al.* (2017), tras un estudio de largo recorrido (esos veintisiete años) en áreas protegidas de Alemania, el 75% de la biomasa de artrópodos voladores se ha perdido. ¿Por qué ha ocurrido esto? Es significativo que el equipo de investigación que ha llevado a cabo el trabajo descarte la hipótesis del cambio climático. La argumentación se basa en la magnitud del descenso de la biomasa y el corto espacio de tiempo en el que se produce. Dicen:

“Esta disminución es evidente, independientemente del tipo de hábitat, mientras que los cambios en el clima, el uso de la tierra y las características del hábitat no pueden explicar esta disminución general”.

El mismo fenómeno ha sido observado en un grupo más concreto de artrópodos. Dentro de los artrópodos, el grupo más diversificado son los insectos y, una vez dentro de los insectos, tenemos a los coleópteros con unas 300.000 especies descritas, y a himenópteros, dípteros y lepidópteros con más de 100.000 cada grupo. Himenópteros y lepidópteros juegan un papel ecológico crítico debido a su papel como polinizadores de plantas con flor. Pues bien, Yolanda Melero y sus colegas de la Universidad Autónoma de Barcelona (España), con los datos aportados durante 23 años por naturalistas aficionados, han estimado que se han producido reducciones de hasta el 70% en las poblaciones de mariposas catalanas. También esto ha sido observado en Reino Unido por un estudio que analiza datos de 17 años y en el cual Ball *et al.* (2022) estimaron la pérdida de las poblaciones de insectos de vuelo activo en un 58,5% para el conjunto de Reino Unido (aunque las diferencias entre Escocia, con una pérdida del 2,9% frente a las pérdidas cercanas al 70% en Inglaterra, nos informan también sobre qué causas están primando en esta caída). En otro estudio realizado sobre datos de Reino Unido por Francesca Mancin *et al.* (2023), esta vez centrándose en el tipo de uso que se le da a la tierra, y cruzando la variable “población de artrópodos” con la variable “uso agrícola” de la tierra concluyeron que *“aunque detectamos disminuciones generales, los grupos de invertebrados están disminuyendo con mayor fuerza en las regiones con alta cobertura de tierras de cultivo. Esto sugiere que incluso a la luz de las políticas y la gestión mejoradas en los últimos 30 años, la forma en que gestionamos las tierras de cultivo no logra conservar ni restaurar las comunidades de invertebrados”.*

En una revisión realizada por Wagner *et al.* (2021) que literariamente titularon *“Death by a thousand cuts”* (que algo interpretativamente podemos traducir como “las mil caras de la muerte”) los autores conceptualizan tres variables generales que explicarían el declive de los insectos en todo el mundo: l) el cambio climático (con los incendios, las sequías,

el incremento de la frecuencia de las lluvias torrenciales o las especies introducidas como subvariables vinculadas), II) la industrialización (con la urbanización y la contaminación como subvariables), y III) el modelo agroindustrial (con la nitrificación, la deforestación, la intensificación agrícola y ganadera, además de los pesticidas, como subvariables). En el mismo sentido, y dando un orden de prioridad a estos factores estresantes, Sánchez-Bayo y Wyckhuys en una revisión realizada en 2019 llegan a conclusiones que deberían hacer que más de un país se replantea su política agrícola y medioambiental:

“Los principales impulsores de la disminución de especies parecen estar en orden de importancia: I) pérdida de hábitat y conversión a agricultura intensiva y urbanización; II) contaminación, principalmente por pesticidas sintéticos y fertilizantes; III) factores biológicos, incluyendo patógenos y especies introducidas; y IV) cambio climático. El último factor es particularmente importante en las regiones tropicales, pero solo afecta a una minoría de especies en climas más fríos y en zonas montañosas de zonas templadas. Se necesita urgentemente un replanteamiento de las prácticas agrícolas actuales, en particular una reducción seria en el uso de pesticidas y su sustitución por prácticas más sostenibles y basadas en la ecología, para retardar o revertir las tendencias actuales, permitir la recuperación de poblaciones de insectos en declive y salvaguardar los servicios ecosistémicos vitales que ellos proveen”.

Sin embargo, es curioso que alguna medidas se están tomando, mientras que otras sistemáticamente se dejan de tomar. Por ejemplo, la EFSA a principios de 2018 reconoció que los neonicotinoides (uno de los grupos de pesticidas más usados sobre animales desde la década de 1980) como potencialmente peligrosos para los polinizadores y, en concreto, contra las abejas melíferas. Por ello limitó fuertemente su uso, dejándolo permitido solamente para invernaderos permanentes. Bajo los mismos presupuestos de daño contra una amplia gama de organismos, como estamos comprobando, la EFSA y el órgano decisor, la Comisión Europea, han emitido informes favorables para que el glifosato se continúe usando de forma intensiva en Europa. En otras regiones del planeta la hipocresía es similar.

Hemos visto someramente (vamos a tratar en profundidad el tema en la sección sobre *The Monsanto papers* y sobre el “asunto Séralini”) las causas de esta permisividad. Aquí cabría destacar que, en el caso de los neonicotinoides, la Comisión Europea ha decidido estas limitaciones porque existe “alternativa” a los neonicotinoides prohibidos. Se prohibieron tres en 2018, y se permitió el uso de uno nuevo, mientras se renovaba la licencia de uso para otro que, según la EFSA, tenía “baja peligrosidad” para las abejas melíferas. Lo cierto y verdad es que, por la propia estructura química de estos pesticidas, y tal y como nos cuenta Anne Fairbrother *et al.* (2014), potencialmente todos estos compuestos son nocivos para los polinizadores. Los artrópodos están siendo exterminados y parece que el primer responsable es el modelo agroindustrial.

¿Qué papel podría estar jugando el glifosato en el decline poblacional de los polinizadores? Esta es una pregunta que se han realizado Z. R. Stahlschmidt *et al.* (2022), añadiendo además la variable “cambio climático”. La primera advertencia que nos hacen los autores es que tenemos que tener muy en cuenta la fase vital por la cual está pasando el insecto y la sensibilidad que ésta pueda tener: no es igualmente sensible un imago (adulto alado) de lepidóptero que suele alimentarse de néctar, que la oruga mientras se alimenta de las hojas de una planta, o la fase pupa (fase quiescente y muy protegida mediante un exoesqueleto grueso y durante la cual ocurre la metamorfosis en los insectos que la realizan). No es lo mismo una ninfa de saltamontes, que posee un exoesqueleto con un menor contenido en quitina, que un adulto, mucho más móvil y con un tegumento más resistente. No es lo mismo que una determinada sustancia afecte a las propiedades sociales, colectivas o críticas de una colonia de insectos polinizadores, que ésta sustancia afecte a individuos, o que afecte de una forma no crítica para el organismo. En resumen, hay una diversidad de respuesta al estrés según la fase vital del insecto.

En segundo lugar debemos conocer un poco de la biología de los insectos: en su ciclo vital es de tremenda importancia lo que se denomina “grados-día”. Los grados-día sintetizan en un concepto diversas propiedades de la biología de los insectos que los hacen completar su ciclo vital de forma más rápida cuando se incrementa la temperatura promedio. Por ejemplo, un mosquito completa su ciclo vital mucho más rápido en verano

que en invierno, llegando al punto de que, si la temperatura baja de un determinado umbral, el desarrollo se detiene. Lo que esto indica, básicamente, es que los insectos son esencialmente poiquiloterms (que la temperatura del organismo varía conforme varía la temperatura ambiental).

Así, Stahlschmidt y sus colegas utilizaron al grillo norteamericano *Gryllus lineaticeps* como organismo modelo y, en una experiencia de laboratorio, manipularon temperatura y concentraciones de glifosato. En un escenario experimental que simulaba escenarios futuros de calentamiento estipulados por el Panel Intergubernamental para el Cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) los autores encontraron que existían diversos costes biológicos: durante el desarrollo de las ninfas se redujo significativamente su tasa de supervivencia, su masa corporal; durante la fase de adulto éstos redujeron notablemente su tamaño corporal, redujeron su capacidad de inversión energética en vuelo y, lo que quizá sea más importante desde el punto de vista evolutivo, en su capacidad de inversión en reproducción. En los adultos también se redujo la tasa de crecimiento y la esperanza de vida.

Por separado, se realizó una experiencia con adición de formulaciones comerciales en base a glifosato a concentraciones habituales de uso agrícola obteniendo resultados más sutiles en los parámetros mencionados para el cambio climático. Sin embargo, lo más relevante es lo que ocurrió cuando se probó un efecto combinado de cambio climático y exposición a herbicidas en base a glifosato: se produjo evidencia de costos aditivos en la tasa de alimentación y crecimiento de la fase de adulto. Es decir, aquello que es malo (cambio climático) y aquello que es malo (formulaciones comerciales en base a glifosato) cuando los juntas, son todavía peores. La ciencia es también esto: dar respaldo empírico a aquello que nos dicta el sentido común. No le va a ir mejor a la biodiversidad de insectos en campos cada vez más intensamente explotados por las grandes compañías de la agroindustria y sometidos a una crisis climática producida por los ricos (ese 1% que es responsable de prácticamente la mitad de las emisiones de CO₂) y las grandes compañías (petroleras y aquellas de uso intensivo de energía).

Hay más evidencias que indicarían que al menos parte del enorme decline poblacional detectado en insectos (y en particular en los insectos

tos polinizadores) viene siendo consecuencia del uso masivo de pesticidas del modelo agrícola imperante y, en concreto, del uso de glifosato.

Por ejemplo, la melanina tiene algo que contarnos al respecto. Esta molécula es un pigmento con múltiples funciones en la biosfera. En mamíferos, suele dar pigmentación a nuestras pieles protegiéndonos a su vez de la radiación UV que nuestra capa de ozono no puede detener. En insectos juega múltiples papeles biológicos: termoregulación (dada la poiquilothermia de los insectos, una coloración oscura puede permitir mayor captación de calor), inmunidad (la acumulación de melanina en torno al parásito suele dar buenos resultados cuando se trata de eliminar a un helminto o de otro artrópodo, actuando de forma similar a la encapsulación que realiza el sistema inmune de vertebrados), control de la virulencia microbiana o la propia protección de los rayos UV. La melanina es producida, tanto en insectos como en vertebrados, mediante un conjunto de reacciones de oxidación-reducción que dependen de metaloproteínas. Esto es importante saberlo porque, como ya hemos visto, el glifosato es capaz de alterar el estado de “estrés oxidativo” de las células en invertebrados e invertebrados. Además, ya hay evidencia en otros organismos de que el glifosato es capaz de detener el proceso de síntesis de la melanina (Nosanchuk *et al.*, 2001).

Con este bagaje, Smith *et al.* (2021) estudiaron los efectos de un amplio rango de concentraciones de glifosato puro (la concentración más alta utilizada fue de 0,2 mg/L) sobre la polilla de la cera *Galleria mellonella* y sobre el mosquito transmisor de la malaria *Anopheles gambiae*. El glifosato produjo una reducción de la supervivencia de la polilla de la cera tras ser infectada por el hongo *Cryptococcus neoformans*. La prueba directa de la implicación del glifosato en esta disminución de la supervivencia fue que la exposición al herbicida redujo el diámetro de los “nódulos melanizados” formados en la hemolinfa para defenderse del hongo. Por su parte, en *Anopheles* el glifosato disminuyó la supervivencia del mosquito no infectado por el parásito causante de la malaria, *Plasmodium falciparum*, además de alterar notablemente la microbiota intestinal de éstos. En aquellos *Anopheles* infectados por el plasmodio y expuestos a glifosato, la carga parasitaria se incrementó significativamente. Además, el estudio aporta pruebas de que el mecanismo

subyacente a toda esta alteración es, precisamente, esas reacciones de oxidación y reducción que necesita la melanina para sintetizarse. La alteración general del equilibrio de las especies oxidantes y reductoras producida por el glifosato alteraría estas reacciones:

“Estos hallazgos sugieren”, dicen los autores, “que la acumulación ambiental de glifosato podría hacer que los insectos sean más susceptibles a patógenos microbianos debido a la inhibición de la melanina, deterioro inmunológico y perturbaciones en la composición de la microbiota, lo que podría contribuir a la disminución de las poblaciones de insectos”.

Y ahora, yendo en concreto a un grupo de polinizadores muy importante, tanto para la biodiversidad de nuestras plantas silvestres tomada en su conjunto, como para la capacidad productora del actual modelo agroindustrial (y, en general, para cualquier modelo agrícola), vamos a ver cómo afecta el glifosato al grupo de los himenópteros apoideos, en los que se incluyen las abejas melíferas y los abejorros.

El metaanálisis más completo hasta la fecha en la que estas líneas se escriben, realizado por Battisti *et al.* (2021) concluye que *“el glifosato puede considerarse tóxico para las abejas”* a concentración de uso agrícola y recomendada por el fabricante, aunque señalan que los estudios son todavía escasos y que potencialmente la toxicidad del herbicida, y de sus formulaciones comerciales, puede verse incrementada conforme avanzan los estudios en otras etapas de la vida (larvas) y en otros contextos (menor exposición). Para que nos hagamos una idea de la extensión del metaanálisis éste recogió datos sobre mortalidad de las abejas publicados entre 1945 y octubre de 2020.

¿Cómo puede estar actuando? Vamos a ver aquí dos variables: I) efectos sobre el comportamiento y el aprendizaje y II) efectos sobre el microbioma intestinal y, a su vez, mayor sensibilidad a patógenos.

Farina *et al.* (2019) estudiaron cómo respondían las habilidades cognitivas y sensoriales de abejas melíferas expuestas a concentraciones de glifosato de 2,5 mg/L. En un primer experimento de condicionamiento clásico, midieron qué porcentaje de abejas extendía su probóscide antes de llegar al contenedor que contenía una solución azucarada de la que podían beber y de la cual habían podido conocer su existencia

previamente. Al inicio de la experiencia, en muy pocos días, el porcentaje de abejas que “sabía lo que había” en el recipiente (extendía su probóscide) ascendió al 80%. Y como en cualquier proceso de aprendizaje, si deja de haber recompensa es difícil mantener la memoria: una vez retiraron la solución azucarada, el porcentaje de abejas que extendía la probóscide obviamente fue descendiendo. Sin embargo, el porcentaje de abejas melíferas expuesta a glifosato que aprendió y reconoció el recipiente como “comida” fue siempre más bajo (rondando el 60%). Perdonen el adjetivo: el glifosato las había vuelto tontas. Además, olvidaron mucho más rápido: tras 5 días sin la recompensa, apenas un 25% de las abejas expuestas seguía recordando que ahí había “un buen caramelo” (sacando la probóscide), mientras que casi el 60% de las no expuestas lo seguía recordando. Las abejas recolectoras (aquellas que salen de la colmena en busca de néctar y polen) expuestas a glifosato tampoco fueron capaces de aprender bien en experimentos, también de condicionamiento, sobre ciertos olores que se asociaban a recompensa. También disminuyeron notablemente el número de vuelos indirectos hasta una fuente de néctar. Es decir, redujeron el comportamiento exploratorio (solamente a concentraciones más elevadas, de 10 mg/L, disminuyeron también los vuelos directos).

Motta *et al.* (2018), viendo las diferentes evidencias que se iba acumulando sobre los efectos del glifosato en diferentes grupos bacterianos y en diferentes microbiomas, decidieron indagar en aquello que ocurría en el intestino de las abejas melíferas y ver si esto podría darnos pistas de la actual crisis demográfica que viven los polinizadores¹⁹⁰. Tres son las conclusiones principales de este trabajos sobre el

¹⁹⁰ *Apis mellifera* es, en realidad, una especie domesticada. Por tanto, en la medida que esto siga siendo así, su peligro de extinción es prácticamente nulo. De hecho, a nivel global, el número de colonias y, por tanto, la producción de miel no ha hecho más que aumentar. Bien es cierto que en Europa o EE.UU. se que han visto reducidas sus capacidades productoras. Dinámica ésta última que parece responder a una dinámica de mercado global más que una disminución de producción debida a otros factores. Por ejemplo, Sofía Pérez Espinazo (2021) en un breve trabajo de fin de Grado recoge algunos de estos datos. Otra cosa muy diferente es si llamamos “abejas” al grupo de los himenópteros apoideos. Las conclusiones sacadas de *A. mellifera* como organismo modelo deben alertarnos sobre lo que puede estar pasando con el resto de apoideos y, en general, con el resto de polinizadores.

microbioma de *Apis mellifera*: I) la práctica totalidad de las bacterias simbioses del tracto digestivo de las abejas melíferas poseen el gen del enzima sensible al glifosato y, por tanto, son potencialmente sensibles al mismo, II) *“la abundancia relativa y absoluta de las especies dominantes en la microbiota intestinal disminuye en las abejas expuestas al glifosato a concentraciones presentes en el medio ambiente”*, variando la composición de la comunidad bacteriana hacia especies menos sensibles al glifosato, III) esto repercutió en una mayor mortalidad de las obreras jóvenes cuando se ven atacadas por la bacteria oportunista *Serratia marcescens*. En resumen y, en palabras del equipo de investigación, *“la exposición de las abejas al glifosato puede perturbar su microbiota intestinal beneficiosa, afectando potencialmente la salud de las abejas y su eficacia como polinizadores”*. En una revisión sobre la relación entre pesticidas y microbiota en las abejas, realizada por el propio Motta y por Nancy A. Moran, y publicada en *Nature* en 2024, se afirma lo siguiente:

“Los miembros de la microbiota ocupan nichos específicos dentro del intestino donde interactúan entre sí y con el hospedador. Participan en interacciones de alimentación cruzada y antagónica, que probablemente contribuyen a la estabilidad de la comunidad y previenen la invasión de patógenos. Una microbiota intestinal intacta brinda protección contra diversos patógenos y parásitos y contribuye al procesamiento de componentes refractarios de la capa de polen y toxinas dietéticas. La ausencia o alteración de la microbiota da lugar a una expresión alterada de genes que subyacen a la inmunidad, el metabolismo, el comportamiento y el desarrollo. En el campo, dicha alteración provocada por los agroquímicos puede afectar negativamente a las abejas”.

La integridad de la microbiota es tan importante como la integridad del propio organismo. De hecho, el consenso actual invita a pensar que ya no cabe hablar de microbiota y organismo que la contiene por separado. Estaríamos más cerca de la noción de “superorganismo” que expresábamos para los líquenes o de “comunidad” que de considerar dos elementos por separado. Esto vale, tanto para abejas como para seres humanos.

Por su parte, un trabajo publicado en *Science* y encabezado por Anja Weidenmüller del Centro de estudios avanzado sobre el comportami-

ento colectivo de Konstanz (Alemania), demostró efectos no esperados del glifosato puro en el abejorro común (*Bombus terrestris*) a una concentración muy por debajo de la utilizada en su aplicación agrícola (5 mg/L). El equipo de investigación no observó diferencias significativas en la tasa de mortalidad y/o en la esperanza de vida de los individuos que componen las colonias de abejorro pero, al comparar algunos rasgos comportamentales de la colonia, vieron que realmente el herbicida estaba comprometiendo la supervivencia del grupo. ¿Cómo?

“Las colonias de abejorros mantienen sus crías a altas temperaturas mediante la termogénesis activa, un requisito previo para el crecimiento y la reproducción de la colonia. Utilizando un enfoque comparativo dentro de la colonia para examinar los efectos de la exposición a largo plazo al glifosato en la termorregulación individual y colectiva, descubrimos que, si bien los efectos son débiles a nivel individual, la capacidad colectiva para mantener las altas temperaturas necesarias para las crías se reduce en más del 25 % durante los períodos de limitación de recursos. Para los polinizadores en nuestros ecosistemas altamente estresados, la exposición al glifosato conlleva costos ocultos que hasta ahora se han pasado por alto en gran medida”.

La termogénesis activa es un comportamiento típico de himenópteros sociales: mediante el aleteo y, por tanto, de la contracción repetida de los músculos de las alas, producen calor. Así consiguen superar su fisiología poiquiloterma convirtiéndose en homeotermos comportamentales¹⁹¹. El glifosato estaría limitando gravemente esta capacidad, en épocas duras como el invierno, mediante algún mecanismo todavía no descubierto¹⁹².

¹⁹¹ En los atunes ocurre algo similar a nivel individual. La fisiología de los peces óseos como el atún es básicamente poiquiloterma. Sin embargo, la cantidad de tejido muscular fisiológicamente muy activo presente en los atunes, sobre todo los de mayor tamaño, hace que en la práctica estos animales acuáticos estén a elevada temperatura y que consigan mantenerla de forma más o menos estable. Son homeotermos en la práctica.

¹⁹² Aunque hemos visto que, en otros artrópodos, la exposición a glifosato altera la concentración de glucógeno muscular y, también, afecta al propio tejido muscular. Así que aquí tenemos una hipótesis útil para seguir indagando sobre la causa subyacente que produce este percance grupal en abejorros.

¿Podría estar detrás del descenso observado de la biomasa y de la biodiversidad de polinizadores y otros insectos el pesticida más usado en agricultura?, ¿podría un herbicida, sin efectos a priori sobre la fauna, causar, al menos en parte, los alarmantes descensos demográficos de la fauna artrópoda? Parece que la respuesta a ambas preguntas, con la evidencia disponible, es sí.

Otros Artrópodos: mariquitas, crisopas o colémbolos.

¿Y qué ocurre con arañas, escarabajos depredadores, mariquitas, crisopas y otros artrópodos esenciales en el mantenimiento del equilibrio ecosistémico? Hemos tratado algunos ejemplos dispersos a lo largo del texto, pero nos gustaría recoger en un apartado propio alguna de la evidencia disponible sobre los efectos del glifosato en otros órdenes del filo más bio-diverso de nuestro planeta (con el permiso metabólico de las bacterias¹⁹³).

La mayor parte de los artrópodos viven en relación directa o indirecta con el suelo¹⁹⁴. Ya hemos revisado algunos ejemplos de lo que ocurre con la edafofauna (aquella parte de animales que más íntimamente vive ligada al suelo), pero necesitamos captar más variables para intentar abastar la complejidad del problema. Son ilustrativos y pedagógicos los estudios que se realizan sobre artrópodos depredadores. Estos animales son clave desde el punto de vista ecológico, pero son también poco tenidos en cuenta, incluso por la propia comunidad científica.

Es por ello que el trabajo de Evans *et al.* (2010) puede guiarnos en este mundo de las especies poco consideradas socialmente. El equipo de

¹⁹³ La catalogación como especie de las bacterias es polémica. Incumplen varios preceptos del concepto biológico de especie (como el de ser capaces de intercambiarse fragmentos de ADN entre cualquier individuo de cualquier “especie”). Las bacterias se entienden mejor como conjuntos de herramientas metabólicas combinables de manera infinita, al menos potencialmente. Es en este sentido metabólico, el grupo más biodiverso del planeta. Casi toda la bioquímica fue inventada antes de la multicelularidad.

¹⁹⁴ Salvo, quizá, el gran grupo de los crustáceos, en el que solo unas pocas especies son terrestres, y algún grupo de arácnidos, como los picnogónidos.

investigación que lideró este estudio trabajó con la preparación comercial en base a glifosato, Buccaneer Plus® (que incluye el coadyuvante POEA en su formulación) y algunos de los artrópodos terrestres de hábitos depredadores más comunes del subcontinente norteamericano: las arañas lobo de la familia Lycosidae (*Hogna helluo* y *Pardosa milvina*) y el escarabajo de tierra *Scarites quadriceps* de la familia carabidae. Observaron que, las tres especies, tras una aplicación de glifosato a concentración de uso agrícola recomendada por el fabricante (12g/L de sal de glifosato en agua), reducían su comportamiento locomotor: pasaban más tiempo quietas que buscando presas. Tras la exposición, y tras un tiempo de observación de 2 meses, comprobaron que *Pardosa milvina* tenía una menor supervivencia que los grupos de control no expuesto a glifosato.

En la misma línea están los resultados de Benamú *et al.* (2010). Este equipo trabajó con un aranéo depredador del subcontinente sudamericano (*Alpaida veniliae*). Indagaron sobre los efectos de las concentraciones de uso agrícola sobre la puesta de huevos, el comportamiento depredador o la formación de telas¹⁹⁵. Los autores, al contrario que Evans y sus colegas, no observaron efectos letales directos del preparado comercial pero, sin embargo, sí observaron efectos negativos sobre el número de presas consumidas (del orden del 20%), una disminución muy significativa en el número de puestas y del número medio de huevos por puesta, y un comportamiento constructor de redes tremendamente alterado.

Otros estudios muy pedagógicos son los realizados sobre los denominados “depredadores naturales” de plagas. Estos animales, si se encuentran en una cantidad suficiente y en el estado de desarrollo adecuado, pueden permitir la coexistencia de un modelo diferente de producción agrícola¹⁹⁶ y el resto de ecosistemas con los que un

¹⁹⁵ En esta ocasión trabajaron con la formulación comercial de glifosato Glifoglex® (la dosis de aplicación recomendada es de 19,2mg/L).

¹⁹⁶ Un modelo que, como ya hemos discutido en otras partes del texto, puede oscilar entre tradicional y orgánico, que puede mezclar elementos de ambos, o incluso responder a nuevas tendencias, pero que en todos los casos limita mucho el uso de plaguicidas y fertilizantes de origen industrial y que, por tanto, puede ser independiente del gran capital y de fuentes de energía fósiles.

agrosistema se encuentra lindando. Por ejemplo, *Eriopis connexa* es un escarabajo coccinélido, primo-hermano de las mariquitas y oriundo del cono sur de América y que, al igual que sus parientes europeas, tiene unas larvas que se alimentan con avidez de pulgones y otros pequeños animales que son plaga de las plantas de cultivo. Luciana Mirande *et al.* (2010) expusieron a GlifoGlex-48® a concentraciones de uso agrícola, a esta especie y comprobaron que todos los parámetros de supervivencia se reducidos drásticamente, tanto en adultos como en larvas. Mantiene como hipótesis que el glifosato estaría alterando algún mecanismo hormonal del desarrollo larval. Marcela I. Schneider *et al.* (2009) evaluaron de forma similar los efectos de aplicaciones agrícolas de glifosato sobre la demografía, en este caso, del crisópido *Chrysoperla externa*. Las denominadas popularmente como crisopas son también esenciales en una comunidad “sana” para la producción agrícola sostenible¹⁹⁷. Las conclusiones fueron similares a Mirande *et al.* (2010): todos los parámetros relacionados con la reproducción y la supervivencia descendieron drásticamente.

Los carábidos son otros escarabajos excelentes controlando de forma natural crecimientos poblacionales de organismos no deseados en un agrosistema. Dóra Szekeres *et al.* (2008) midieron cuan diferente era la biodiversidad de los campos tratados con glifosato (y en los cuales se estaban cultivando OMG resistentes a glifosato), con los campos donde no se estaba utilizando el herbicida. Las conclusiones fueron claras: la densidad de carábidos, y su diversidad, era mucho menor en los campos donde se cultivaban OMG. El mecanismo propuesto por el cual se estaba produciendo este efecto, resulta evidente: el glifosato hace desaparecer las “plantas no deseadas” que es donde muchas de estas especies de escarabajos hace su vida. Este mismo resultado fue obtenido por J. P. Pereira *et al.* (2018), pero en colémbolos (unos escarabajos considerados parte de la edafofauna). Tangencialmente, demostraron también efectos noci-

¹⁹⁷ Para un debate sobre una de las palabras más manoseadas y vaciadas de significado en el diccionario de la ecología política (la propia palabra de sostenibilidad) se puede leer a Andreu Escrivà en su “*contra la sostenibilidad*”, publicado en 2023 por Arpa editores.

vos del glifosato sobre otros grupos de artrópodos controladores de plagas: pulgones depredadores y hormigas depredadoras. Este equipo investigador comprobó que “*la aplicación de glifosato en la soja transgénica redujo la densidad de los ácaros depredadores de la familia Galumnidae, de las hormigas depredadoras de los géneros Neivamyrmex y Solenopsis y de los escarabajos colémbolos de la familia Entomobryidae y Onychiuridae (Collembola), y los del género Hypogastrura*”.

Una pequeña conclusión que podemos extraer de estos estudios es que, por un lado, cuando el cultivo transgénico, dependiente en su mayoría de uso del herbicida glifosato (al menos tres de los cultivos más producidos del mundo: algodón, soja y maíz) y, en general, en la mayoría de planes de cultivo extensivo, el uso de este herbicida prometía grandes aumentos de productividad. Es lógico: eliminando los competidores (“plantas no deseadas”), los nutrientes del suelo quedan todos disponibles para nuestro cultivo. Pero, nada es tan simple y lineal en biología. Quizá, lo que pudiéramos estar ganando al eliminar a los competidores de nuestros cultivos, lo estamos perdiendo al eliminar a sus potenciales aliados, como los depredadores naturales, que mantienen a raya a las plagas y que desarrollan sus ciclos vitales precisamente en las “plantas no deseadas”.

Este factor quizá pueda ayudar, también, a explicar cómo es posible que los aumentos de productividad no hallan variado desde 1920 en EE.UU para el algodón, la soja y el maíz, pese a la llamada revolución verde (uso masivo de fertilizantes y pesticidas) y la introducción de los transgénicos (en los tres cultivos ya suponen más del 90% de los cultivos en EE.UU).

Glifosato y sus efectos sobre el sistema nervioso de mamíferos.

Hasta este punto del libro se ha intentado dejar de lado términos propios de la biología molecular que, en ocasiones, causan más confusión y carga mental, que ayudan a explicar un proceso determinado. Si se ha hecho en algún caso es porque ese término es considerado clave. Sin embargo, hay algunas razones por las cuales en este apar-

tado aparezcan más términos de este tipo. Por ejemplo, los niveles de detalle molecular con los que conocemos la fisiología de vertebrados es mayor; las bases de datos con las que se trabaja en investigación de “vertebrados superiores” son mucho más grandes; y la financiación que reciben los grupos de investigación que trabajan con modelos de investigación animal “más próximos” a humanos también lo es. Esto lo demuestra el tipo de estudios que hemos estado revisando hasta ahora: muy pocos de ellos entraban en aspectos moleculares y, si lo hacían, como mucho se exploraba una o dos variables moleculares o, quizá, la expresión de algún gen.

Ahora vamos a hablar, sobre todo, de investigación hecha sobre roedores y veremos que se pueden estudiar, a la vez, la expresión de varios genes implicados en un proceso fisiológico o metabólico, la cuantificación del conjunto de proteínas expresadas por un conjunto de genes de interés y seguir la pista a otras reacciones que influyen sobre el proceso. Esto hará que, a veces, la explicación pueda volverse algo confusa. Se va a intentar, no obstante, mantener el foco en la esencia de la explicación. Detallar el proceso completo es una labor de transparencia que no siempre se hace desde la “divulgación científica”. Se suele trabajar más desde la afirmación categórica y simple rozando, algunas veces, la pura propaganda. Cada vez que aparezca una denominación propia del campo de la biología molecular, explicaremos debidamente su significado. Quitando de estos elementos propios de la especialidad (que son meramente etiquetas que concentran la información), el resto de procesos implicados y de los efectos causados por el glifosato son perfectamente comprensibles por cualquier persona.

En lo que respecta al apartado vamos a seguir la excelente revisión realizada por Carmen Costas-Ferreira *et al.* (2022) ya citada anteriormente. En ella encontramos recopilados y analizados decenas de trabajos que demuestran los efectos del glifosato y de los herbicidas en base a glifosato sobre I) el desarrollo temprano del sistema nervioso, II) la comunicación entre neuronas, III) efectos sobre el comportamiento y IV) el estrés oxidativo y sus efectos sobre la muerte neuronal. En toda la revisión no se hace hincapié en la concentración a la que se observan los efectos.

Antes de explicar todos estos hallazgos, necesitamos saber un poco de histología básica del sistema nervioso para situar las diferentes “geografías de la disrupción” que producen el glifosato y los herbicidas en base a glifosato en el sistema nervioso de mamíferos. Existen dos grandes conjuntos de células en nuestro sistema nervioso: las neuronas y las células gliales. Las neuronas son las células más conocidas del sistema nervioso. Las hay de muchas morfologías y funcionalidades (unipolares, bipolares, multipolares, sin axones, inhibidoras, activadoras, etc.). Agilizando el viaje del “impulso nervioso”, protegiendo y contribuyendo a la nutrición de estas células están los oligodendrocitos, que forman parte de la glía, y las células de Schwann. Las primeras las encontramos dentro del sistema nervioso central y las segundas en el sistema nervioso periférico (en los nervios que van a tus brazos, por ejemplo). La glía, además, está compuesta por otros dos tipos celulares: astrocitos y microglía.

Además, protegiendo todo el sistema nervioso central de la entrada de sustancias que puedan desequilibrar el tremendo ajuste metabólico que hace posible el procesamiento de la realidad que realiza el cerebro, existe lo que se denomina “barrera hematoencefálica”: un complejo sistema de células y de controles moleculares a la entrada de sustancias hacia el tejido nervioso. De forma muy simplificada se puede decir que consiste en un conjunto de células unidas muy estrechamente entre sí que, a su vez, mantienen un estrecho contacto con los vasos sanguíneos. Entre las células de los vasos sanguíneos (células endoteliales) y las células estrechamente unidas de la barrera hematoencefálica (ependimocitos) existe un muy regulado intercambio molecular, sobre todo relativo a la glucosa. La glucosa es el combustible principal del cerebro. A diferencia de otros tejidos, el cerebro no puede catabolizar ni ácidos grasos, ni proteínas, ni hidratos de carbono más complejos o diferentes de la glucosa¹⁹⁸. Estos ependimocitos están conectados, a través de exten-

¹⁹⁸ Esto no es del todo cierto. Además de glucosa, el cerebro puede utilizar para su metabolismo los denominados cuerpos cetónicos. Son moléculas de 3 a 5 carbonos resultado del catabolismo de ácidos grasos de número de carbonos impar y/o con insaturaciones. Éstas son producidas, sobre todo, en el hígado y en los astrocitos.

siones celulares, a los astrocitos. A efectos prácticos, son una especie de microsistema circulatorio por el que solamente pasan nutrientes y algunas sustancias efectoras.

El desarrollo temprano del sistema nervioso

Vayamos viendo ejemplos de los efectos del glifosato sobre este complejo sistema tisular. Recordemos que el desarrollo embrionario es una época de nuestro desarrollo vital como organismos donde el propio sistema biológico es más sensible a la perturbación. Así que no es extraño que observemos efectos en un sentido u otro, dependiendo de las concentraciones y del momento de bioactividad de una determinada sustancia. Esto es casi un principio universal. Tenemos el ejemplo de la proteína S100B. Es una proteína que se expresa, principalmente, en las células de la glía y, en concreto, en los astrocitos. A concentraciones normales durante el desarrollo embrionario esta proteína actúa promoviendo el crecimiento y división celular, y actúa positivamente para la supervivencia neuronal en caso de lesión tisular. Si esas concentraciones se incrementan mucho (pasando, de 1 a 1000 unidades arbitrarias o, lo que es lo mismo, un incremento en un factor mil), la proteína S100B pasa, de ser un “factor neurotrófico” a ser un tóxico neuronal, activando la expresión de moléculas proinflamatorias¹⁹⁹ que acaban causando muerte celular por apoptosis y otras vías. Pues bien, en roedores expuestos a glifosato durante el desarrollo embrionario se observó que, durante el mismo, se producía una regulación a la baja de la expresión de la proteína S100B y, cuando éstas llegaban a la vida adulta, se produjo el efecto contrario: las ratas que habían sido expuestas intrauterinamente al glifosato tenían una sobreexpresión de la proteína. Esto nos estaría indicando que, durante el desarrollo embrionario el glifosato actúan como un inhibidor de la maduración

¹⁹⁹ En este caso son las citoquinas, que le indican a nuestro sistema inmune que hay una lesión y hay que acudir a la zona y proceder con la fagocitosis o con la agresión mediante anticuerpos, entre otras reacciones del sistema inmune y de otras células. Siempre que exista la secreción de moléculas proinflamatorias estamos ante una señal de daño celular.

y correcto devenir del tejido nervioso y, durante la adultez, podría ser un estresante capaz de causar muerte neuronal.

Hay mucha evidencia en otros sistemas genético-moleculares de que esto es así. Por ejemplo, la exposición subcrónica a herbicidas basados en glifosato produce una disminución de la complejidad dendrítica y de la cantidad de sinapsis que se forman en el hipocampo²⁰⁰. En esta misma región del cerebro, produjo la alteración de la expresión de un conjunto de proteínas que controlan la formación de circuitos neuronales (la denominada vía Wnt5a/CaMKII²⁰¹). También en el hipocampo y en la corteza prefrontal, el glifosato causó una menor expresión del factor neurotrófico derivado del cerebro, una molécula crucial, crítica, en la neurogénesis, en el crecimiento, en la supervivencia ante el daño tisular y en la plasticidad neuronal. En ratas expuestas a glifosato durante la gestación y la lactancia se observó que, también en el hipocampo, se produjo un descenso de la activación de la familia de proteínas NF-κB. Las NF-κB (o Factor nuclear potenciador de las cadenas ligeras kappa de las células B Activadas) son una familia de proteínas muy polivalentes: fomentan de la diferenciación celular, incrementan

²⁰⁰ El hipocampo es una estructura de nuestro cerebro situada por debajo del neocórtex, hacia el interior de nuestro cerebro. Tiene una forma de plátano estrecho que iría desde la parte posterior de nuestro cráneo hasta la anterior, siempre en la porción más interna del cerebro. Su función básica es la de la memoria y, en particular, la memoria espacial y la orientación. Hay algunos estudios muy llamativos sobre cómo las palomas mensajeras y los taxistas de Londres, de forma paralela, a lo largo de su “desempeño profesional” incrementan el tamaño y funcionalidad de esta estructura cerebral. Hablamos que, en el caso de las palomas mensajeras, la hipertrofia del hipocampo llegaba al 10% con respecto a palomas de vida “normal”.

²⁰¹ Los genes Wnt en su conjunto son esenciales durante el desarrollo embrionario. Están implicados en la morfogénesis de múltiples estructuras corporales (epitelio pulmonar, tracto reproductivo, etc.). Casi todas las proteínas que se expresan durante el desarrollo tienen un papel importante en los procesos de muerte celular y/o patologías relacionadas con el sobre-crecimiento celular, como el cáncer. Por su parte la CaMKII, o Ca2+/calmodulina proteína cinasa II, es una proteína implicada en múltiples cascadas de señalización. Es, digámoslo de esta manera, una especie de amplificador de la señal. Si ambas proteínas son reguladas a la baja, la señal de crecimiento y diferenciación celular será mucho menor.

la supervivencia en caso de daño tisular, intervienen en la plasticidad sináptica, son esenciales en el proceso de la neurogénesis en adultos, etc. Para Costas-Ferreira *et al.* (2022) esto *“indica que la exposición temprana a este compuesto [glifosato] podría afectar la neurogénesis y por tanto el correcto desarrollo del sistema nervioso central”*. Además de la vía Wnt5a/CaMKII, el glifosato ha mostrado su neurotoxicidad en el hipocampo activando otras cascadas de señalización celular, como aquellas que involucran a la quinasa regulada por señales extracelulares (ERK). La ERK también participa en múltiples funciones positivas para el tejido nervioso, pero su activación puede también llevar a la apoptosis neuronal.

Nadie dijo que la biología fuera fácil. Breve inciso: este tipo de efectos de diferentes vías de señalización son un buen ejemplo de una de las tesis que se manejan en este libro, a saber, que muchas veces el efecto de una determinada sustancia no correlaciona con el incremento de su dosis. Alfredo Caro Maldonado gusta de etiquetar a las sustancias que actúan sobre un organismo y modifican los equilibrios existentes como *“sustancias bioactivas”*. Este término se ajustaría más a una realidad biológica compleja, donde no siempre una sustancia tóxica actúa como tal o donde una sustancia inicialmente inocua lo es a cualquier concentración²⁰².

La principal evidencia de que la ERK está siendo activada y causando muerte neuronal ante la exposición a glifosato es que, junto con la activación de la ERK, también aumentan los niveles de glutamato, un aminoácido que participa en la inducción de la apoptosis en algunos casos y que, como veremos, también es importante como neurotransmisor. No nos extrañemos también si, al desregularse los niveles extracelulares de glutamato que tienen como consecuencia el incremento de la apoptosis, también se produzcan efectos en la neurotransmisión en el sistema glutaminérgico.

Además de estos efectos sobre cascadas de señalización y de algunas proteínas moduladoras de la expresión génica, hay un interesante trabajo de Ji *et al.* (2017) en el cual se demuestra que la exposición a her-

202 Comunicación personal, 2023.

bicidas en base a glifosato en ratas modifica la expresión de múltiples microARN²⁰³ en la región del cortex prefrontal. Todos ellos relacionados con el desarrollo cerebral y algunos con relación estrecha en alguna patología. Esto ayuda a entender, afirma el equipo de investigación, porque *“varios estudios han informado evidencia que vincula los trastornos del desarrollo neurológico con la exposición gestacional al glifosato”*.

La comunicación entre neuronas.

Una de las principales razones para limitar el uso de los pesticidas organofosforados²⁰⁴ fue su neurotoxicidad. Ésta se basa en la inhibición fuerte del enzima acetilcolinesterasa. Esta enzima es crítica en el sistema colinérgico del sistema nervioso de los animales (de todos, invertebrados y vertebrados). El neurotransmisor acetilcolina es el utilizado por estas vías nerviosas para comunicar información entre las diferentes neuronas. Esta vía está implicada en el aprendizaje, la atención y la plasticidad neuronal, en el procesamiento de la memoria (en vertebrados). En la parte del sistema nervioso dedicada a la locomoción, estas vías dependientes de acetilcolina son las responsables de la contracción muscular. La inhibición de la acetilcolinesterasa produce una contracción muscular permanente y, por tanto, rigidez y la muerte si hay una exposición prolongada a una sustancia de unión irreversible a esta enzima. Esto ocurre con los organofosforados (y también con el

203 Los microARN son ARN no codificantes. Los planes de estudio de la enseñanza básica y media plantean al ARN como un portador de información que va, desde el núcleo, hasta el ribosoma para ser traducido en forma de proteína. Es así como la información genética pasa, de ser algo *“escrito”* en una molécula como el ADN a ser una realidad tangible: una proteína con efectos reales en la biología de la célula. Existen muchos tipos de ARN con diferentes funciones. Estos microARN son codificados también por nuestro ADN pero, en lugar de servir como *“plantilla”* para producir una proteína, ellos mismos son capaces de *“enrollarse”* sobre el ARN o el ADN y producir efectos moduladores de la expresión génica. En 2024 se dio el premio Nobel a sus descubridores (pero no a sus descubridoras). Para profundizar sobre este claro ejemplo de machismo en la ciencia se puede leer *“Más allá del premio Nobel: por una ciencia colectiva”*, La Paradoja de Jevons (14 de octubre, 2024).

204 Por ejemplo, la Unión Europea prohibió en 2020 el uso del organofosforado clorpirifós. Sin embargo no ha prohibido su fabricación.

gas nervioso sarín). Afortunadamente el glifosato es un inhibidor muy débil de esta enzima, aunque sí que tiene efectos desregulatorios sobre las vías colinérgicas. Se ha demostrado que produce una caída en la expresión de la colina acetil transferasa y del número de neuronas colinérgicas, reduciendo también el número de receptores de acetilcolina en el hipocampo. Esta vía “septohipocámpica” está implicada en el procesamiento de la memoria. La reducción de la intensidad de la “señal” colinérgica no es una buena noticia para nuestros recuerdos.

Otra vía de comunicación importante entre neuronas es el llamado sistema glutaminérgico. Está implicado en múltiples procesos: aprendizaje, memoria, etc. El glutamato es el neurotransmisor excitador más extendido y, como hemos dicho, existe un fino control sobre las concentraciones extracelulares del mismo. Una reducción de la captación del neurotransmisor por parte de los astrocitos o un incremento en su liberación por parte de las neuronas puede implicar problemas en los procesos cognitivos en los que el sistema está implicado. La exposición a herbicidas en base a glifosato ha demostrado su capacidad para, precisamente, elevar la liberación del glutamato y reducir la eficiencia de los astrocitos en su reciclaje. También, como hemos visto, un exceso de glutamato puede servir de señal citológica para una apoptosis neuronal.

Quizá una de las vías de comunicación más conocidas por todos es el sistema dopaminérgico. La película *Despertares* (1990)²⁰⁵, basada a su vez en el libro homónimo de Oliver Sacks, nos cuenta la historia de unos pacientes paralizados por algún tipo de enfermedad neurológica causada por una encefalitis, y que llevan viviendo años en una de las tétricas instituciones que en EE.UU. reservaban a tal efecto para estos enfermos durante los años 1960-1970. La administración de L-dopa los devuelve a la vida, una vida activa y normal, hasta que por habituación al fármaco, vuelven a su estado catatónico. Como la propia historia sugiere, el sistema dopaminérgico está implicado en la locomoción y su alteración produce diferentes enfermedades neurodegenerativas. En la película *Despertares* estamos ante una “paralización” del sistema por falta del neurotransmisor dopamina. Si alguna de las vías neuronales

205 Título original *Awakenings*. Dirigida por Penny Marshall.

falla o se produce un exceso de dopamina, nos situamos en el otro extremo: movimientos erráticos y descoordinados: enfermedad de Parkinson o las diferentes “coreas”²⁰⁶ que existen.

La exposición a herbicidas en base a glifosato, tanto en adultos como de forma temprana, causa la alteración de la neurotransmisión dopaminérgica y, en concreto, altera una vía esencial para la coordinación de la locomoción (la vía nigroestriatal) y una vía del sistema de recompensa (la vía mesocorticolímbica, importante en las adicciones). También se ha visto que produce una disminución en la cantidad total de dopamina en el cuerpo estriado²⁰⁷, en el hipocampo y en el lóbulo prefrontal, pero incrementando la neurotransmisión dopaminérgica entre el lóbulo prefrontal y el hipocampo²⁰⁸. También se ha visto cómo disminuye la cantidad de dopamina unida a sus receptores específicos en el núcleo *accumbens*²⁰⁹. También se ha podido observar que el glifosato es capaz de disminuir la cantidad de neuronas serotoninérgicas

206 Coreas, en el argot médico, agrupa a un conjunto de trastornos caracterizados por movimientos involuntarios y anormales. Deriva del griego “khoreia” que significa “baile”.

207 El cuerpo estriado tiene una morfología similar al hipocampo, pero de más tamaño (en el ser humano). En los mamíferos se sitúa por encima del hipocampo y por debajo de la corteza cerebral (son estructuras subcorticales tanto el cuerpo estriado como el hipocampo, por tanto). Es una estructura de intercambio y procesamiento de información que proviene de la corteza y que va (y/o que proviene) hacia la misma desde otras estructuras (hipocampo, cerebelo, córtex visual, córtex auditivo, etc.). Es una especie de nodo ferroviario. Por tanto participa en múltiples funciones: aprendizaje motor, procesamiento de la memoria, psicomotricidad, memoria de trabajo, regulación de la conducta motivada, etc. Especialmente importante en todas ellas las conexiones dopaminérgicas o, en términos coloquiales, todo aquello que dependa de la motivación para realizarse.

208 Este tipo de efectos se observan continuamente en biología, sobre todo a concentraciones pequeñas de una determinada sustancia. Es una de las tesis de este texto: hay sustancias bioactivas que, dependiendo de la concentración, producen efectos sobre los organismos. El concepto “sustancia segura” o “concentración segura” son meras quimeras conceptuales.

209 Esta región es una subporción anterior del cuerpo estriado. Tiene un rol importante en las descargas importantes de dopamina. Se le ha llegado a denominar “el centro del placer” del cerebro. De central importancia en el circuito de la recompensa y, por tanto, implicado en las adicciones.

y que hace disminuir en diferentes áreas cerebrales la cantidad de serotonina y de noradrenalina²¹⁰.

¿Cual es la buena noticia? Que hasta donde se conoce, todas estas alteraciones dopaminérgicas (y de otra índole) parecen temporales y no permanentes. Estamos a tiempo de dejar de utilizar el glifosato como herbicida.

Efectos sobre el comportamiento

Los efectos sobre el comportamiento tendrán, en parte, su base en las alteraciones de la neurotransmisión que hemos visto. Así lo afirman Costas-Ferreira *et al.* (2022). Por ejemplo, la exposición tanto a glifosato como a herbicidas basados en glifosato, disminuye la locomoción (sistema dopaminérgico). También se ha observado que esta exposición incrementa los niveles de ansiedad y de comportamientos similares a la depresión (sistema serotoninérgico) y un ostensible deterioro del funcionamiento cognitivo por disminución de los procesos de aprendizaje y de memoria (sistema colinérgico).

También se ha observado que las madres de *Rattus rattus* expuestas disminuían sus comportamientos de cuidados hacia su descendencia (comportamiento de lamido). Esta falta de cuidados sobre la prole se ha ligado con la disminución del comportamiento social cuando se convierten en adultos y, esto, directamente al a exposición a glifosato a concentraciones elevadas por Yassine Ait-Bali *et al.* (2020).

El estrés oxidativo y sus efectos sobre la muerte neuronal

Ya hemos visto para otros organismos que la capacidad de producir estrés oxidativo del glifosato es un hecho, ya sea a través del incremento de las especies reactivas del oxígeno, del desajuste de la maquinaria enzimática destinada a la regulación de la presencia de estas especies químicas en las células o del incremento de la peroxidación lipídica.

²¹⁰ Esta es otra vía diferente a las otras tres tratadas sobre la que, todavía, no se dispone de tanta información.

Esto también se ha demostrado en roedores. Además, se ha podido demostrar que también afecta a la concentración de los tioles, unos potentes antioxidantes que ven disminuida su presencia tras la exposición a glifosato. En lo que respecta a la maquinaria enzimática capaz de deshacerse de las especies reactivas del oxígeno, se ha visto que la exposición a glifosato hace caer la actividad de la superóxidodismutasa y de la catalasa, e incrementa la actividad de la glutatión peroxidasa²¹¹ en los roedores. En cuanto a la expresión genética, la superóxidodismutasa paradójicamente incrementada su expresión. La ruta metabólica de la síntesis del glutatión también se ve afectada. El glutatión es uno de los antioxidantes intrínsecos del cerebro. La parte positiva es que este efecto puede verse paliado a través de rutas metabólicas alternativas.

Otro daño importante observado en roedores tras la exposición a glifosato y relacionado con el estrés oxidativo es la disfunción mitocondrial en los astrocitos. Recordemos que los astrocitos son esenciales en la producción de cuerpos cetónicos y por ellos pasa también buena parte de la nutrición de las neuronas. La exposición a glifosato inhibe la maquinaria enzimática que permite a las mitocondrias de estas células producir energía. Lo hace de cuatro maneras diferentes: I) inhibe el transporte de electrones que realiza esta maquinaria. Este transporte de electrones permite crear un gradiente químico que, en última instancia, permite a la mitocondria guardar esta energía química en forma de la "moneda energética universalmente aceptada: el ATP; II) Inhibe la creatina quinasa (CK), una proteína capaz de sacar parte de esta energía contenida en el ATP para usarla en la construcción de moléculas; III) a la vez que inhibe el transporte de electrones, disipa el gradiente químico que éstos forman durante su trasiego; IV) disminuye la cantidad de cardiolipina en la membrana interna de la mitocondria. Éste es

²¹¹ Estas tres enzimas son básicas en el sistema de detoxificación de casi cualquier organismo. La superóxido dismutasa se encarga de romper la peligrosa molécula O_3^{-2} o superóxido. Esta molécula tremendamente reactiva. Hablando en plata: un poquito de ión es capaz de desmontar una célula. La catalasa es capaz de dividir el H_2O_2 (agua oxigenada). También es una molécula capaz de atacar muchas moléculas orgánicas y oxidarlas. Por su parte, la glutatión peroxidasa realiza una función similar, pero es especialmente importante en el tejido nervioso.

un lípido importante para que se complete con éxito el transporte de electrones (que ocurre precisamente ahí, en la membrana interna de la mitocondria) y, además, es muy sensible al estrés oxidativo.

También se ha observado una reducción general de la masa de mitocondrias en los astrocitos. Esto se debe fundamentalmente a que este tipo de disfunciones, junto con el incremento de las especies reactivas del oxígeno, suelen ser señal suficiente para que se active la mitofagia: la célula decide destruir esa mitocondria que está funcionando mal. En este sentido, también se ha visto que la exposición a glifosato incrementa la producción del factor de necrosis tumoral (α -TNF)²¹² y el incremento de especies químicas reactivas del nitrógeno (porque se incrementa la producción del neurotransmisor NO) en la glía en general y en los astrocitos en particular. Se produce, por tanto, lo que el equipo autor de la revisión denomina “neuroinflamación desequilibrada”.

Todos estos daños por estrés oxidativo e inflamación deberían hacernos pensar que realmente existe una conexión entre daño celular, muerte celular y glifosato. Y de hecho, existe evidencia sobre esto. La principal vía para que una célula decida “suicidarse” (por la razón que sea: porque su funcionamiento es erróneo, porque está siendo atacada, porque hay demasiado errores en su genoma, etc.) es la denominada apoptosis o “muerte celular programada” inducida por la propia célula. Hay diversas formas en las cuales esto puede ocurrir. Una es la denominada “vía mitocondrial”. Las mitocondrias son tan esenciales para nuestras células que graves errores en su funcionamiento son interpretados biológicamente como algo lo suficientemente lesivo para el conjunto del organismo que hay una vía molecular que parte desde las mitocondrias y que determina la muerte de toda la célula. Todo empieza en la denominada proteína BAX o “proteína reguladora de la Apoptosis”. En realidad es una parte pequeña de un conjunto más grande de proteínas. Si se incrementa la cantidad de BAX pro-apoptótica en el citosol, ésta se activa y es capaz de perforar la membrana de la mitocondria. Otras

212 Una molécula implicada en la inflamación y en la defensa del organismo y cuyo incremento está relacionada con múltiples enfermedades neurodegenerativas como el alzheimer, y otras enfermedades inflamatorias crónicas, como la psoriasis.

proteínas de esta familia son anti-apoptóticas, como bcl-2²¹³. Cuando BAX perfora la mitocondria, esto permite que uno de los citocromos que están en la cadena de transporte electrónico, el citocromo C, salga al citosol celular. Este citocromo es responsable de iniciar la cadena de reacciones que terminarán con la muerte celular (en ella están implicadas en este caso las caspasas 8 y 9). Pues bien, el glifosato incrementa la expresión génica de BAX y disminuye la de bcl-2.

Después de repasar esta colección de daños sobre el tejido nervioso de mamíferos no nos queda más que sorprendernos por la flexibilidad interpretativa de las autoridades reguladoras para no tomar en la consideración que se merecen estos resultados. En palabras del equipo autor de la revisión: *“muchos de los pesticidas más utilizados en todo el mundo ejercen sus efectos neurotóxicos a través de mecanismos de estrés oxidativo. El estrés oxidativo ocurre cuando hay un desequilibrio entre la producción de especies reactivas del oxígeno y la capacidad antioxidante del sistema encargado de desintoxicar estos productos reactivos. En consecuencia, se produce daño oxidativo de biomoléculas esenciales, como proteínas, lípidos y ADN. El sistema nervioso es particularmente vulnerable al daño oxidativo, principalmente debido a su bajo nivel de actividad antioxidante, su alto requerimiento de oxígeno y su alta composición de lípidos”*.

Conclusiones

¡Que los nombres complicados no nos impidan ver el bosque! La acumulación de evidencias en este apartado, y todas aquellas que ya hemos visto a lo largo del texto, debería hacernos exclamar “¿cómo es posible que la Unión Europea halla extendido el periodo de autorización para el uso agrícola del glifosato, y sus formulaciones comerciales, hasta

213 Quizá a algunos lectores esta proteína les suene. Suele estar implicada en cánceres con mal pronóstico y la presencia de algunas variantes génicas en algunos individuos les predispone a algunos tipos de cáncer, como el de mama o colon. Al ser una proteína anti-apoptótica, impide que los linfocitos T *natural killer* actúen como es debido y, una vez iniciada la mitosis descontrolada del cáncer, éste no se autoinduzca la muerte celular.

2030?, ¿cómo es posible que los decisores públicos no sean capaces de seguir los sensatos pasos de la administración de Andrés Manuel López Obrador en México y prohibir el uso de este herbicida?

Szandra Klátyik *et al.* (2023) han realizado una revisión sobre la ecotoxicidad del glifosato, y sus formulaciones comerciales, en los ecosistemas terrestres juntando para ello evidencia de 2010 a 2023. Se va a citar a continuación un extracto completo de las conclusiones de dicha revisión que recoge también la esencia de este texto hasta el momento:

“Existe una suposición generalizada de que los herbicidas en base a glifosato [GBH], y el propio glifosato [GLI], son preparados específicos y que solo afectan a las plantas de malezas objetivo. En esta revisión hemos recopilado amplia evidencia publicada desde 2010 que muestra que éstos tienen múltiples efectos en varios organismos no objetivo en los ecosistemas terrestres. Independientemente del hecho de que el glifosato puede ser menos tóxico que muchos otros herbicidas, los efectos secundarios no deseados en una variedad de organismos, incluidos microorganismos, invertebrados y vertebrados, son evidentes especialmente tras la exposición crónica. Los principales mecanismos de estos efectos son el estrés oxidativo, la desregulación metabólica, las alteraciones del metaboloma, las alteraciones endocrinas y la genotoxicidad, incluido el daño directo al ADN. Después de la exposición, las consecuencias de estos efectos se manifiestan en varios resultados fisiológicos y conductuales. El uso global extremadamente alto de GLI/GBH, que supera las 800 mil toneladas anuales desde 2014, aumenta la probabilidad de exposición y aumenta los riesgos para el medio ambiente y la salud”.

Por su parte, en un metaanálisis de 1282 observaciones realizadas en 121 estudios diferentes, Evalén *et al.* (2024) encontraron que efectivamente el glifosato, y sus preparados comerciales, eran tóxicos para la vida animal, especialmente para aquellos de vida acuática. Confirman los efectos estadísticamente significativos sobre el comportamiento, la fisiología y la reproducción.

También queda claro que uno de los principales problemas del uso del glifosato es que necesita de coadyuvantes para poder penetrar en

las plantas y, por la evidencia que hemos manejado, parece que buena parte del problema podría estar en estos productos que, en muchas ocasiones, no pueden ser conocidos e investigados adecuadamente por considerarse secreto comercial. Ni en un caso tan evidente de invocación del principio de precaución son, nuestras autoridades, capaces de despriorizar las ganancias privadas y los derechos de propiedad.

Y un último apunte. Este texto es un monográfico sobre el glifosato, pero no perdamos de vista una cosa: la mayor parte de tratamientos pesticidas en nuestro planeta son, en realidad, cócteles de principios activos. Es habitual que en una parcela coincidan diversos insecticidas, fungicidas y herbicidas. La situación más habitual en una linde de un campo es que las plantas y los animales allí presentes no tengan que hacer frente solamente a la contaminación por glifosato, sino que existan diferentes combinaciones de herbicidas. Es precisamente este cóctel bioactivo el que se ha comenzado a estudiar por parte de diversos grupos de investigación. Mesnage *et al.* (2023) establecido un protocolo para estudiar los efectos combinados de tres herbicidas²¹⁴ (dicamba, 2,4-D y Glifosato)²¹⁵ sobre el desarrollo embrionario en roedores²¹⁶. Combinaron 0,5 mg de glifosato, 0,3 mg de dicamba y 0,02 mg de 2,4-D administrando esta dosis por cada kilogramo de roedor y para cada día. Estas son las dosis de ingesta diaria seguras según la normativa de Unión Europea para cada herbicida. Se han empezado a producir algunos resultados, como los de Kuz'min *et al.* (2024) que indican también esta toxicidad combinada y de los efectos aditivos que tiene la exposición combinada a varios pesticidas.

²¹⁴ Este protocolo ha sido ideado para variar los pesticidas a utilizar

²¹⁵ Dicamba es un herbicida sistémico y específico porque imita una de las hormonas vegetales que controlan el crecimiento y la división celular: las auxinas. En 2016 Monsanto desarrolló OMG resistentes a Dicamba. El 2,4-D (o ácido 2,4-diclorofenoxiacético) es otro herbicida sistémico que imita las auxinas. Ambos operan incrementando la tasa de reproducción celular en vegetales y llevando rápidamente a la planta hacia la senescencia y la muerte. ¿Son tan específico como pensábamos?, ¿pueden las auxinas afectar a animales?

²¹⁶ Utilizaron ratas de la cepa Wistar para el experimento. Se estudian todo tipo de variables del desarrollo, de anatomopatología y de fisiología general.

Los humanos

¿Cómo comprobar la existencia de algo que está por todas partes?, ¿cómo sustraerse a la normalidad de su presencia y deducir de esa normalidad una excepción? Este problema metodológico se ha afrontado diversas veces en la historia de la ciencia. La radiación de fondo de nuestro universo, y cuyo descubrimiento apoyaba de manera muy poderosa la hipótesis del *Big Bang* como origen del universo, era algo que predecía la teoría, en primer lugar del físico Georges Lemaître, y que desarrollarían para su localización (entre otros) Robert Dicke y Jim Peebles. Estos dos físicos, junto otros investigadores de la Universidad de Princeton (EE.UU.), incluso llegaron a desarrollar un aparato para detectar esta radiación (el radiómetro de Dicke). No tuvieron éxito.

Por otro lado Robert W. Wilson y Arno Penzias trabajaban para los laboratorios Bell diseñando, construyendo y haciendo funcionar antenas capaces de recibir las ondas emitidas por satélites en órbita. Estamos en el principio de la década de 1960 y la carrera espacial había comenzado con el lanzamiento del sputnik por la URSS en 1957. Durante varios meses trabajaron durante horas para poner a punto la nueva antena de los laboratorios: una antena de bocina enorme de 6 metros de longitud²¹⁷. No conseguían una salida del canal limpia. Siempre, a todas horas, de noche y de día, había un ruido de fondo que la antena captaba y que estaba por todas partes: hacia el norte, hacia el sur, etc. Era estática²¹⁸. No había forma de eliminar ese ruido que podía interferir gravemente con las comunicaciones recibidas desde un satélite. En sus manos cayó la noticia de que Dicke y su equipo estaban probando el radiómetro Dicke para encontrar la radiación de fondo. ¡Eureka!, perdón: serendipia. Wilson y Penzias *estaban midiendo*

²¹⁷ Las antenas de bocina, como su nombre parece indicar, tienen una morfología alargada, similar al claxon clásico de los coches. Su morfología contrasta con las antenas habituales en nuestros tejados (parabólicas y de televisión).

²¹⁸ Llegaron a sospechar que podían ser excrementos de paloma dentro de la bocina o emisiones de la ciudad de Los Ángeles, cercana a los laboratorios Bell.

encontrando por todas partes la radiación de fondo de microondas que apoyaba la hipótesis del *Big Bang*.

No somos capaces de ver las cosas incluso cuando estamos rodeados de ellas. Esta historia muy simplificada aquí demuestra que solamente se produce el descubrimiento cuando el contexto social y político es el adecuado. Hay un libro precioso, *"Historias de la ciencia y del olvido"*, donde a través de diversos ensayos escritos por las mejores plumas de la popularización de la ciencia del siglo XX, se narran historias sobre descubrimientos que llegaron "demasiado pronto" y fueron ignorados por ello²¹⁹.

De igual forma parecería que una contaminación de fondo a base de glifosato y las decenas de miles de sustancias producidas por la industria química y de uso masivo²²⁰ sería motivo de preocupación y de acción para los decisores de las sociedades que estén sometidas a esa polución. Recordemos la revisión de Matozzo *et al.* (2020) que indicaba que prácticamente cualquier lugar del planeta tierra que contemplemos, incluyendo el vapor de agua que contiene el viento o la propia lluvia contiene concentraciones detectables de glifosato (entre 1-3 µg/L en la mayoría de casos). De hecho, un trabajo realizado por Cousins *et al.* (2022) detectó compuestos perfluoroalquilados y polifluoroalquilados (PFAS)²²¹ en aguas de lluvia de todo el planeta, haciéndolas no potables según los estándares más actuales de la Unión Europea, por ejemplo.

219 Editado por Robert B. Silvers y traducido al castellano por la editorial Siruela. Contiene textos de Oliver Sacks, Daniel J. Kevles, Richard C. Lewontin, Stephen Jay Gould y Jonathan Miller.

220 Hay literalmente decenas de miles de sustancias incorporadas a todos los productos de consumo: retardantes de llama, colorantes, estabilizadores, filtros UV, plásticos de todo tipo, plaguicidas de todo tipo en los alimentos, flexibilizantes, etc. Por ejemplo, de las 14000 sustancias conocidas como "Químicos en contacto con alimentos" (Food contact Chemilicals o FCCs), según Birgit Guecke *et al.* (2024) más de 3600 están presentes en el cuerpo de los seres humanos.

221 Compuestos sintéticos bioacumulables cancerígenos utilizados, según la ECHA, en "la industria aeroespacial y de defensa, la automotriz, la aviación, los materiales en contacto con alimentos, los textiles, el cuero y la indumentaria, los productos de construcción y para el hogar, la electrónica, la lucha contra incendios, el procesamiento de alimentos y los artículos médicos".

Los "olvidos" de los avances científicos que se produjeron "antes de tiempo" fueron, en no pocos casos, ideológicos. Hildegarda de Bingen concebía la fisiología humana de una manera mucho más cercana al modelo ilustrado que vendría más de 600 años después de ella vivir²²² y, lo más importante, su concepción del cuerpo humano desafiaba a Galeno, el Hombre de la medicina por excelencia. Fue ignorada²²³. En biología, además, tenemos el terrible honor de poseer una de las historias de ocultación e invisibilización del descubrimiento realizado por una mujer con más evidencias de la historia: Rosalind Franklin y su eliminación como descubridora de la estructura del ADN²²⁴.

En el caso de los plaguicidas, y en el caso concreto del glifosato, tenemos también la evidencia publicada y disponible tanto para la ciudadanía como para los decisores públicos. Es una evidencia que se contabiliza por decenas de miles de artículos revisados por pares. Es una evidencia potente. De hecho, es un consenso científico. Aquellos artículos, publicados también bajo los mismos estándares, que no comparten o que contradicen esta evidencia tienen, en muchos casos, financiación o influencia de la industria agroquímica. Es una afirmación que, con la evidencia presentada en este capítulo, será inapelable. El conflicto de intereses es, por tanto, evidente.

¿Qué es entonces lo que no nos permite utilizar la "antena de bocina" para llegar a la conclusión obvia de que la caída actual de la biodiversidad, los límites más que evidentes en los aumentos de esperanza de vida, los incrementos en las tasas de cáncer en personas relativamente jóvenes, los cambios nulos en las tasas de crecimiento de la producción agrícola (o incluso la caída de las mismas), etc. no tienen un origen, al menos parcial, en el uso y abuso del modelo agroindustrial basado en pesticidas y la agricultura intensiva?

222 Nació en 1098 y murió en 1179 d.n.e. Entre 1151 y 1158 escribió su tratado médico "*Libro sobre las propiedades naturales de las cosas creadas*".

223 La bibliografía de Patricia González Gutiérrez está llena de información sobre la invisibilización de la obra científica de la mujer. Una invisibilización hecha a conciencia por los hombres dominantes en cada época.

224 Se puede leer un análisis divulgativo pero riguroso en Peretó (2020), publicado en la revista *Mètode*.

El caso “Lee” Johnson y la epidemiología demuestran que el glifosato es carcinogénico

Imagínate que estás trabajando para una empresa que emplea productos químicos de todo tipo. En la mayor parte de regiones del mundo existe una clasificación toxicológica de estos productos, con pictogramas que acompañan la etiqueta para hacer fácilmente identificable el producto según su peligrosidad. Imagina que durante una semana te toca trabajar con productos que el organismo regulador de tu país considera bastante seguros. Sin embargo, decides equiparte con equipos de protección individual y, pese a que has tomado precauciones, sufres el peor de los accidentes laborales que puedes tener cuando trabajas con productos químicos y preparados comerciales en base a esos productos: que el preparado se te caiga encima. Éste te recubre por completo. Esto te ha pasado en un país sin un sistema público de sanidad y sin una regulación clara sobre los derechos laborales que obligue a empresas y fabricantes a unos determinados estándares, sino que ha optado por el modelo de autoregulación: cada empresa fabricante analiza sus propios productos y decide autoimponerse la normativa necesaria.

Así comenzó la historia de Dewayne Anthony “Lee” Johnson en 2014. Así es la realidad laboral Estados Unidos. Lee sufrió un accidente laboral al manipular Ranger Pro®, un preparado comercial de Monsanto en base a glifosato y con aproximadamente un 60% de surfactantes. El herbicida más comercial de esta multinacional (ahora Bayer-Monsanto) como hemos visto es Roundup® que posee también una gran cantidad de surfactantes. Es utilizado incluso en jardinería doméstica y urbana. Otros como “Lee” vendrían después. Así nos cuenta lo que ocurrió después Carey Gillam en *The Monsanto Papers*:

“En noviembre de 2014, Lee llamó a Monsanto directamente después de encontrar un número de teléfono de la empresa en Internet. Una mujer que trabajaba como especialista en soporte de productos escuchó a Lee describir su accidente con el tanque de aplicación y su preocupación de que éste podría ser la causa de

su cáncer. Ella prometió tratar de encontrar a alguien que pudiera devolverle la llamada con respuestas a sus preguntas, documentando la descripción de Lee de este accidente con el aplicador y sus lesiones en la piel en un correo electrónico [que envía] a uno de los expertos médicos de Monsanto. «Todo su cuerpo está cubierto de esto [lesiones] y los médicos dicen que es cáncer de piel», escribió. «Solo está tratando de averiguar si todo podría estar relacionado con una exposición tan grande a Ranger Pro... Está buscando respuestas». Lee nunca recibió la devolución de la llamada. Sin pruebas que respaldaran sus sospechas, continuó trabajando como pudo, y continuó rociando incluso mientras se sometía a tratamientos para su cáncer.”

Existen, al menos, cinco estudios epidemiológicos que ponen de relieve que la exposición al glifosato en entornos laborales de elevado riesgo de contacto con el herbicida son entornos que incrementan el riesgo de padecer cáncer y en concreto, cáncer linfático del subtipo linfoma no-Hodgkin.

Eriksson *et al.* (2008) evaluaron la posibilidad epidemiológica de que distintos productos fitosanitarios estuvieran incrementando la probabilidad de padecer cáncer. Para ello, estudiaron el nivel de exposición a estos productos y los compararon con los respectivos controles. También utilizaron lo que en estadística se conoce como los “Odds ratio” o la *razón de probabilidad*. Básicamente consiste en comparar diversos grupos de datos que, a priori, son similares salvo en la variable que se quiere estudiar: en este caso variaba el nivel de exposición a herbicidas. Esta razón de probabilidad era, por término medio, de 1.72 para todo el conjunto de herbicidas analizado y éste se mantenía por un periodo superior a los 10 años. Esto quiere decir que, en aquellos grupos expuestos a herbicidas, la probabilidad de padecer cáncer era 1.72 veces superior que en aquellos grupos no expuestos. En concreto, el glifosato dio una *razón de probabilidades* algo mayor, de 2.02, mientras que los insecticidas, los clorofenoles, el arsénico, y otros productos plaguicidas (rodenticidas o fungicidas) daban razones de probabilidad inferiores al 1.5. Probados cancerí-

genos dando razones de probabilidad para el cáncer inferiores a las del glifosato²²⁵.

Claudia Bolognesi *et al.* (2009) estudiaron los efectos genotóxicos de glifosato sobre los jornaleros que trabajan en fincas donde se utiliza glifosato y sobre los habitantes de zonas donde se ha utilizado el glifosato para erradicar cultivos ilícitos y, por tanto, uno de los argumentos que se arguyó para legitimar estos “tratamientos” fue el de control de la producción de drogas. La realidad es que, como demuestra este estudio, estaban haciendo mucho más que destruir plantas de coca. Tanto en los jornaleros de las fincas donde se utilizaba glifosato, como las personas expuestas a los rociados aéreos, la frecuencia de células linfocíticas binucleadas con micronúcleos²²⁶ era significativamente mayor que, por ejemplo, en los jornaleros de las fincas donde se producía café mediante técnicas de cultivo orgánicas. Llama poderosamente la atención que la conclusión del estudio de un riesgo bajo dado que la presencia de linfocitos con dos núcleos es uno de los principales ensayos utilizados *in vitro* para realizar una conexión causal entre citotoxicidad/genotoxicidad y una determinada sustancia. Es lo que Eastmond y Tucker (1989) denominaron “detección de agentes inductores de aneuploidía” en su ya clásico trabajo académico. Aneuploidía significa que el número de cromosomas no coincide con el que debería ser. Si el número de cromosomas no coincide, como demuestran los propios autores, ¿qué mejor marcador de riesgo necesitan?

Un análisis epidemiológico realizado por Zhang *et al.* (2019), de la Escuela de salud pública de la Universidad de Berkeley (EE.UU.), indagó sobre cómo se incrementa la probabilidad de padecer linfoma no-Hodgkin en aquellas personas trabajadoras expuestas a glifosato. En

225 Por ejemplo, existe evidencia epidemiológica de carcinogenicidad de los clorofenoles desde, al menos, 1992, con el ya clásico estudio de Lampi *et al.* (1992) en una comunidad finlandesa en la cual un aserradero local había producido la contaminación de todo el sistema de agua potable por estos compuestos utilizados como conservantes y plaguicidas para la madera.

226 Este tipo de análisis en busca de linfocitos binucleados es una especie de ensayo de micronúcleos. Ya hemos visto con anterioridad en que consiste el ensayo de micronúcleos y porqué es un marcador de daño genético muy robusto.

su revisión de los datos detectan que la probabilidad de padecer este cáncer es de 41% superior en aquellas personas expuestas por sus condiciones laborales que en aquellas que no trabajan diariamente con el herbicida. Con estos datos en la mano, recomiendan encarecidamente el estudio concreto de las diferentes formulaciones comerciales y de sus coadyuvantes esos, que las mismas empresas productoras, no dejan estudiar por considerarlos secretos comerciales.

En esta misma línea encontramos el trabajo de Meloni *et al.* (2021). Estudiaron la probabilidad de padecer el tipo de linfoma no-Hodgkin más común (el linfoma folicular) si la persona se ha visto expuesta a glifosato: “*el riesgo de linfoma folicular se elevó 7 veces en sujetos clasificados como alguna vez expuestos al glifosato (...), 4,5 veces en asociación con un nivel de exposición acumulativo medio-alto, 12 veces con una intensidad de exposición media-alta y 6 veces con exposición durante 10 días o más por año*”. El trabajo recogió 867 casos de linfoma folicular en Italia entre los años 2011 y 2017. ¿Por qué las autoridades sanitarias del país transalpino no han intervenido ante la rotundidad de estos datos? Resultados también similares fueron obtenidos para un conjunto mayor de herbicidas (incluyendo al glifosato) por Hardell *et al.* (2022) con un “Odds ratio” para el glifosato de 2,2 y que replica los resultados obtenidos por Eriksson *et al.* (2008). En este estudio se incluía el incremento de la probabilidad de padecer Linfoma no-Hodgkin y la tricoleucemia²²⁷.

Hay que ser justos. Hay al menos otros dos trabajos con un enfoque más general (de tipo revisión) que no encuentran asociación entre la exposición a glifosato y ningún tipo de cáncer. Ambos no encuentran esta relación porque descartan de su análisis los trabajos que sí contienen información relevante sobre esta relación. Lo hacen en base al bajo número de pacientes o casos recogidos o a los “fallos metodológicos” de los mismo. Este es el caso de la revisión realizada por Pamela J. Mink *et al.* (2012) concluyen que “*en la literatura epidemiológica actualmente disponible sobre el glifosato y el cáncer no hay evidencia de un patrón*”

227 La tricoleucemia es un subtipo de las denominadas leucemias crónicas. Dentro de ellas, no es de las más graves. Solamente se trata a aquellas con sintomatología grave y el tratamiento suele ser efectivo. Las leucemias agudas son enfermedades tremendamente graves. Sin embargo, la tricoleucemia no deja de ser un cáncer sanguíneo.

consistente de asociaciones positivas que fueran indicativas de una relación causal entre cualquier cáncer y la exposición al glifosato". El segundo firmante de este trabajo es Jack S. Mandel, consultor de Monsanto en las fechas en las que se firma el informe. El otro trabajo, más reciente, de Acquavella *et al.* (2016) concluye que "en general, nuestra revisión no encontró respaldo en la literatura epidemiológica para una asociación causal entre el glifosato y el linfoma no Hodgkin o el mieloma múltiple". El propio Acquavella trabajó para Monsanto de 1989 hasta 2004 y, hasta la publicación del artículo, era asesor legal de la compañía. 4 de los 5 firmantes de este informe han trabajado o trabajan para Monsanto, tanto de forma orgánica para la compañía, como de forma externa como asesores. Dos de ellos como asesores en casos relacionados con el glifosato y su capacidad de producir cáncer (en este caso leucemia). Estos autores son David Garabrantb, Tom Sorahan y Douglas L. Weede (además del propio Acquavella). Especial es el caso de Sorahan, que fue además miembro del *European Glyphosate toxicology Advisor Panel* y observador de Monsanto para la redacción del Informe de la IARC "Evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides", de 2015, en el cual se declaró al glifosato como sustancia del Grupo 2A o, lo que es lo mismo, "probablemente carcinógeno". Posteriormente veremos que la capacidad de la multinacional para colocar información supuestamente de relevancia científica en revistas prestigiosas y la capacidad restringir la libertad de expresión y de publicación del sector agroindustrial es muy poderosa.

Epidemiología del Parkinson y efectos sobre el sistema nervioso de los herbicidas en base a glifosato.

El 5 de septiembre de 2023 el Comité Asesor de Expertos Médicos del Ministerio Federal de Trabajo y Asuntos sociales (*Bundesministerium für Arbeit und Soziales* o BMAS) emitió un informe en el cual se proponía al "Síndrome de Parkinson causado por pesticidas" como enfermedad profesional para aquellas personas expuestas profesionalmente a estos

compuestos. Con este informe en 2024 el BMAS estableció legalmente esta nueva enfermedad profesional en virtud a la evidencia científica revisada por el comité asesor (cf. BMAS, 2023). Desde 2012, y firmado por el conservador François Fillon, Francia reconoce legalmente el Parkinson causado por exposición profesional a pesticidas como enfermedad profesional.

Los daños neurológicos causados en general por los pesticidas parecen evidentes y demostrables. La evidencia es consistente. Además de la declaración por dos de los Estados fundadores de la Unión Europea de la enfermedad profesional "Síndrome de Parkinson causado por pesticidas", la Comisión Europea se ha valido de la misma evidencia para prohibir o limitar numerosos pesticidas. Vamos solamente a citar tres trabajos de la amplia bibliografía disponible.

"Llegamos a la conclusión de que los pesticidas desempeñan un papel destacado en la patogénesis de la Enfermedad de Parkinson" afirman Vellingiri *et al.* (2022) y destacan que hay sobrada evidencia, incluyendo mecanismos probables de acción, de diversos pesticidas: dieldrina, paraquat, rotenona o Maneb. Estos mecanismos probables comparten vías metabólicas afectadas por el glifosato. Sin embargo, la principal hipótesis que implicaría a muchos de los pesticidas en la Enfermedad de Parkinson es la "inhibición del proteasoma". El proteasoma es un conglomerado proteico muy complejo cuya principal función es la degradación de proteínas. Wang *et al.* (2006) demostraron empíricamente que muchos pesticidas inhibían este complejo proteico a concentraciones extremadamente bajas compatibles con la exposición crónica ocupacional y que, por tanto, existía un potencial vínculo entre enfermedades neurodegenerativas y exposición a pesticidas. Carolina Vaccari *et al.* (2019) encontró, en un estudio epidemiológico, que la Enfermedad de Parkinson tenía un 25% más de incidencia en los grupos expuestos frecuentemente al herbicida paraquat. Hay estudios similares para otros pesticidas.

También hemos visto la capacidad lesiva del glifosato sobre el sistema nervioso de muchos organismos, desde el nemátodo *Caenorhabditis elegans*, hasta mamíferos o insectos. Con esta información es más que razonable hacerse la pregunta de si el glifosato y sus

preparados comerciales pueden afectar la salud neuronal en seres humanos, ¿no?

Chang *et al.* (2022) realizaron una revisión de la literatura científica disponible sobre la relación entre la exposición al glifosato y los daños neurológicos. Exponen claramente que utilizaron 25 trabajos y que los evaluaron en calidad conforme a la guía establecida para este tipo de revisión en la Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU. (EPA). La elección de la metodología de evaluación no es baladí. La metodología afirma que *“se priorizaron los estudios que evaluaron el uso personal de glifosato, mientras que los que evaluaron la exposición indirecta (que no sea el uso personal) se calificaron como de baja calidad, ya que los datos de biomonitorio indican que las métricas indirectas de la exposición al glifosato casi siempre equivalen a dosis de glifosato no detectables.”* Hemos visto que los datos referentes a los niveles séricos, en orina y en otros fluidos en humanos indican que esto no es cierto. Las conclusiones del trabajo son que *“no se ha demostrado ninguna asociación entre el glifosato y ningún resultado neurológico en humanos”*.

Sin embargo, si vamos a las referencias utilizadas y vemos qué trabajos han sido catalogados como de “alta calidad” y, por tanto tenidos en cuenta en la revisión, y cuales catalogados de “baja calidad” y *“se consideraron poco informativos sobre los posibles efectos neurotóxicos”*, veremos qué es lo que ha ocurrido en esta revisión: los trabajos de “alta calidad” son los que no han encontrado un vínculo causal entre exposición al glifosato y efectos neurológicos adversos y aquellos de “baja calidad” son los que sí lo han encontrado. La revisión, además, está firmada como autor principal por John F. Acquavella y ya hemos visto los conflictos de intereses que tiene. El trabajo, además, ha sido financiado el *Glyphosate Renewal Group*, que como veremos es un lobby formado por las principales empresas agroindustriales en Europa para la renovación de la licencia del herbicida. Los otros dos autores del texto también ha trabajado, directa o indirectamente, para Bayer-Monsanto.

La primera pista de que este tipo de revisiones, que busca realmente seleccionar (de forma muy caballerosa y técnica, por otro lado) la información adecuada para tener un resultado ya preestablecido, son

erróneas la podemos encontrar en estudios empíricos como los de Eriguchi *et al.* (2019). Recordemos que Chang *et al.* (2022), Acquavella *et al.* (2016) y Mink *et al.* (2012) no son trabajos empíricos, son revisiones.

Eriguchi y sus colegas recogieron 7 informes médicos de exposición al glifosato en personas que acabaron en síndromes de Enfermedad de Parkinson (ya sea por una exposición mediante la ingestión, por inhalación de las pulverizaciones en casa o en el trabajo, o por exposición dérmica). Destacan la juventud de las personas que padecieron este síndrome y que la evidencia previa sobre los efectos neurológicos del herbicida en el tejido nervioso de múltiples animales inducen a pensar en una relación causal. Además, todas las personas que firman el informe trabajan para universidades públicas japonesas y para nadie más.

Se pueden revisar esta evidencia que apunta a efectos neurológicos sobre humanos de la exposición a glifosato y sus preparados comerciales en Madani & Carpenter (2022). En el resumen de su trabajo afirman que:

“Al igual que con varios otros herbicidas, la exposición a los herbicidas en base a glifosato se ha asociado con un mayor riesgo de enfermedad de Parkinson y muerte de neuronas en la sustancia negra. También hay algunas pruebas que implican a Roundup® en un riesgo elevado de autismo. Otros estudios han demostrado los efectos de los herbicidas en base a glifosato en la transmisión sináptica en animales y celulares animales. El principal mecanismo de acción parece ser el estrés oxidativo, acompañado de disfunción mitocondrial. Además, algunas bacterias intestinales utilizan el enzima que utilizan las plantas, y se ha demostrado que el uso de glifosato altera el microbioma intestinal. Existe una gran y creciente evidencia de que el microbioma intestinal altera la susceptibilidad a un gran número de enfermedades humanas, incluida la función del sistema nervioso”.

Este asunto ha llevado a considerar a algunos autores que las regulaciones al respecto del glifosato, su uso y la protección para la salud neurológica son deficientes dadas las evidencias presentadas que vinculan potencialmente la exposición al herbicida y la Enfermedad de Parkinson. Incluso se ha publicado una carta enviada a la

prestigiosa revista médica *The Lancet* firmada por Bloem & Boonstra (2023) tratando este tema.

Uno de los trabajos considerados de “baja calidad” por Chang *et al.* (2022) utilizó los certificados de defunción y los datos sobre aplicación de pesticidas para cruzar ambas variables y determinar qué ocurría con la probabilidad de sufrir muerte prematura por Enfermedad de Parkinson si tu residencia habitual se encontraba en una zona donde a menos de 1000 metros se utilizaba paraquat, diazinón, atrazina o glifosato. El trabajo, firmado por Mariah Caballero y por un nutrido e interdisciplinar grupo de investigación de la Universidad Estatal de Washington y publicado en 2018 señaló que *“las personas expuestas al uso de la tierra asociado con el glifosato tuvieron un 33% más de probabilidades de mortalidad prematura que las que no estuvieron expuestas”*. Obtuvieron resultados similares para el conjunto de pesticidas y, en concreto, para el Paraquat. Recordemos que ya se ha citado literatura similar que va en la misma dirección.

Alteración del microbioma intestinal humano debido a la exposición al glifosato y sus efectos sobre la salud.

En Europa, hay más de medio millón de casos de Enfermedades inflamatorias crónicas del intestino, diagnosticadas cada año²²⁸. La incidencia es superior en Estados Unidos y algo menos en Oceanía. Es un problema de salud de primer orden. Para Bonaz (2010) la microbiota intestinal juega un papel esencial en el mantenimiento del flujo de información entre el cerebro y el intestino y, probablemente, su distorsión está implicada en la aparición, progreso, sintomatología y patología de las enfermedades inflamatorias del intestino. Dice Bonaz:

“El cerebro es capaz de integrar las señales que llegan del tracto digestivo en una red autónoma central organizada alrededor del hi-

²²⁸ Carolina Figueroa (2019). estas Enfermedades Inflamatorias Intestinales son, fundamentalmente, dos: la colitis ulcerosa y la enfermedad de Crohn.

potálamo, el sistema límbico y la corteza cerebral (ínsula, prefrontal, cingulada) y, a cambio, modificar el sistema nervioso autónomo y el eje hipotálamo-hipofisario-suprarrenal en el marco de bucles fisiológicos. Una disfunción de estas interacciones cerebro-intestino, favorecida por el estrés, está probablemente implicada en la fisiopatología de enfermedades digestivas como el síndrome del intestino irritable o incluso las enfermedades inflamatorias intestinales. Un mejor conocimiento de estas interacciones cerebro-intestino tiene implicaciones terapéuticas en el ámbito de la farmacología, la neurofisiología, la gestión conductual y cognitiva”.

Recordemos que el glifosato inhibe la EPSP sintetasa, presente en plantas y en muchos microorganismos. Puigbò *et al.* (2022) ha revisado la información disponible en bases de datos sobre el genoma de simbioses microbianos humanos (de cualquier parte del cuerpo) y han concluido que más del 50% del mismo es virtualmente sensible al glifosato al depender de la EPSP sintetasa para sintetizar los aminoácidos esenciales tirosina, el triptófano y la fenilalanina, llegando a ser el 66% en el caso del microbioma intestinal. Bien es cierto que buena parte de la microbiota intestinal, pese a tener acceso a esta ruta metabólica en su genoma, no parece usarla dentro del tubo digestivo y prefiere adquirir los aminoácidos necesarios del lumen intestinal. También existen especies bacterianas que potencialmente podrían degradar el glifosato²²⁹. Esto nos da un contexto complejo que vuelve a asimilarse a un ecosistema que se ve perturbado por la llegada de una sustancia bioactiva extraña.

El equipo de Robin Mesnage del departamento de genética médica y molecular del King's College de Londres (Reino Unido) se puso a indagar empíricamente sobre esta complejidad. En Mesnage *et al.* (2021) trabajaron con ratas Sprague-Dawley y las trataron con glifosato y Roundup®. Comprobaron que los niveles de ácido shikímico se acumulaban en el tubo digestivo de las ratas, probando que había inhibición de la EPSP sintetasa. Se observó también un cambio en la composición específica de la microbiota. En Mesnage *et al.* (2021) cultivaron microbi-

²²⁹ Ver Mesnage & Antoniou (2020).

ota intestinal proveniente de humanos (niños y niñas, concretamente) con 100mg/L de Roundup® y glifosato. Los hallazgos son reveladores:

“Roundup y, en menor medida, el glifosato provocaron un aumento en la actividad de fermentación, lo que resultó en la acidificación del entorno microbiano (...). La producción de amonio, que refleja actividades proteolíticas, aumentó con la exposición a Roundup. La metabolómica global reveló alteraciones a gran escala, incluida una mayor abundancia de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga. Los cambios en la composición bacteriana (...) sugirieron que los lactobacilos habían visto estimulado su crecimiento poblacional como resultado de la acidificación del microambiente. (...) En conjunto, nuestros resultados sugieren que el glifosato puede ejercer efectos sobre la microbiota intestinal humana”.

Esta evidencia concreta del grupo de Mesnage es corroborada por la más extensa revisión de Walsh *et al.* (2023). También hemos visto ya que estos cambios de microbiota se producen en ratas y humanos que padecen obesidad y cómo son de la misma naturaleza de los causados por el glifosato (cf. Mao *et al.*, 2018; Turnbaugh, 2006).

El glifosato es un disruptor endocrino en humanos.

Ya hemos mostrado en el texto que existe una abundante evidencia sobre el efecto disruptor endocrino del Glifosato y de los herbicidas en base a glifosato en una diversa panoplia de animales. No podemos extrañarnos que también empiecen a aparecer evidencias directas sobre este efecto en humanos. No se repetirá suficiente: la fisiología básica de los animales, en su esencia más íntima, es muy similar. Y si un determinado compuesto acaba afectando herramientas metabólicas sitiadas en las mitocondrias (como parece que es el caso del glifosato, afectando la síntesis de hormonas esteroideas a través de la afectación del citocromo P450), sus efectos se vuelven más universales: todas las células eucariotas

tienen mitocondrias. Potencialmente, en cualquier organismo que se produzca biosíntesis de compuestos esteroideos existirá bioactividad del glifosato.

Un buen sistema de análisis para comprobar si una determinada sustancia perturba el equilibrio molecular hormonal de un determinado tejido son aquellos con elevada presencia de receptores hormonales. Hablando en plata: aquellos tejidos preparados para responder a una determinada señal hormonal. Un subtipo particular de estos tejidos son los tumores que crecen gracias a que su crecimiento es estimulado por la presencia anormalmente alta de estos receptores la superficie de las células que lo componen. Esto ocurre, por ejemplo, en algunos tipos de cánceres de mama²³⁰. Las líneas celulares de tumores se utilizan de forma rutinaria como modelos de experimentación. Por ejemplo, las líneas MCF-7 y T47D son consideradas óptimas para el estudio de cáncer de mama sensible a estrógenos según Yu *et al.* (2017). En 2007 un grupo de investigadores del Departamento de biociencias integrativas del Colegio de medicina veterinaria y de ciencias biomédicas de la Universidad A&M de Texas (EE.UU.), encabezado por R. Hokanson, utilizó la línea celular de cáncer de mama humano MCF-7 para comprender mejor los mecanismos de formación y crecimiento de estos tumores dependientes de estrógenos. Llegaron a la conclusión de que la expresión de los genes regulados por los estrógenos estaba completamente alterada en esta línea tumoral. Esto quiere decir que, tanto errores de regulación internos, como la estimulación externa mediante un exceso hormonal y/o compuestos que puedan actuar como hormonas (disruptores endocrinos), pueden estimular la aparición de estos tumores.

Gasnier *et al.* (2009) informaron de que el glifosato alteraba la expresión de los dos genes responsables de la síntesis de los receptores

²³⁰ Gros modo existen cánceres de mama positivos a receptores estrogénicos (ER+), positivos a receptores de progesterona (EP+), positivos a receptores del factores de crecimiento epidérmico humano tipo 2 (HER2+), triples positivos (positivo a los tres tipos de receptores y triples negativos).

estrogénicos de nuestras células²³¹ (en la línea celular HepG2²³²) y demostraron que también alteraba la expresión del receptor de andrógenos en células de ducto mamario²³³.

Posteriormente, un equipo del Centro de toxicología y salud ambiental del Ministerio de Educación en Bangkok (Tailandia), encabezado por Siriporn Thongprakaisang, consiguió demostrar hasta qué punto el glifosato podía actuar como disruptor endocrino en humanos, utilizando para ello dos líneas celulares cáncer de mama sensibles a estrógenos²³⁴. En estos experimentos *in vitro* se observó que los receptores para estrógenos vieron incrementada su expresión genética entre 5 y 13 veces en respuesta a la exposición a niveles de glifosato realmente bajos. ¡Estamos hablando de nanogramos! Esto son concentraciones muy inferiores a lo que se ha encontrado en tejidos y orina de seres humanos (*cf.* Krüger *et al.*, 2014).

Sritana *et al.* (2018) trabajaron sobre una línea celular de cáncer de vías biliares que es sensible a estrógenos²³⁵. Comprobaron que, tras

231 Cuando se habla de receptores del estrógeno normalmente se refiere a receptores nucleares del estrógeno. Existen otro tipo de receptores de estrógenos situados en la membrana plasmática. En los receptores nucleares, a su vez, existen dos genes que sintetizan dos “versiones” de la proteína que actuará como receptor: receptor de estrógeno alfa (ER β) y beta (Er β). La “forma activa” del receptor es un dímero de cualquiera de estas “versiones” del receptor: dos de estas proteínas se unen y son capaces de recibir los estrógenos y de iniciar, en consecuencia, cascadas de reacción que acabarán dando como resultado los efectos conocidos de los estrógenos.

232 Esta línea celular es una línea celular de cáncer de hígado humano que es sensible a las hormonas esteroideas.

233 Los ductos mamaros son los conductos encargados de transportar la leche materna desde los acinos, donde se produce, hasta el pezón y están compuestos básicamente de células epiteliales. Allí se producen la mayor parte de cánceres de mama. La línea celular utilizada en este caso fue MDA-MB-453, línea que no tiene origen tumoral.

234 Utilizaron dos líneas celulares de cáncer de mama: T47D y DMDA-MB231. Ya hemos visto que la línea T47D es ideal para estudiar los efectos de los estrógenos sobre un tumor sensible a estrógenos.

235 Es la línea celular HuCCA-1. Esta línea celular, que es modelo de investigación para el colangiocarcinoma o carcinoma de vías biliares, es positiva al receptor de estrógenos. En principio, el epitelio de estas vías no debería ser especialmente sensible a la activación de su crecimiento por parte de una sustancia estrogénica. Sin embargo, en los procesos cancerígenos como es sabido, la expresión de múltiples genes se altera, con el objetivo básico que tiene todo cáncer: crecer y crecer sin límite.

una sola exposición a muy bajas concentraciones de glifosato (también del orden de nanogramos, en un rango entre 1690 ng/L y 1,69 ng/L), se indujo una de las vías de señalización que activa el receptor de estrógeno y se alteraban los niveles de expresión de diversas proteínas importantes en el control de la división celular.

Elaine Stur *et al.* (2019) comprobaron que estas distorsiones ocurrían también con otras muchas proteínas relacionadas, precisamente, con la agresividad de los tumores, con el descontrol de la división celular y con el control del ciclo de duplicación o reparación del ADN en dos líneas celulares no tumorales de mama. En este caso se utilizaron concentraciones de glifosato del orden del miligramo por cada litro (concentraciones más elevadas de las que podemos encontrar en niveles de exposición crónica en humanos, pero compatibles con una concentración sérica tras una exposición aguda en un entorno laboral).

Quizá la prueba más contundente sobre la naturaleza de disruptor endocrino del glifosato la encontremos en la revisión realizada por Muñoz *et al.* (2021) y en la cual se analizan las diez características clave que debería hacernos sospechar sobre la potencial naturaleza de disruptor endocrino de la misma definidas por Michele A. La Merrill *et al.* (2020). En el consenso de expertos de La Merrill y sus colegas expertos en disruptores endocrinos, que publicaron en *Nature*, se define disruptor endocrino como “*sustancias químicas exógenas que interfieren en la acción hormonal, aumentando así el riesgo de resultados adversos para la salud, como cáncer, deterioro reproductivo, déficit cognitivo y obesidad*”. ¿Cuales son esas diez características clave? I) La sustancia interactúa con, o activa, un receptor hormonal; II) la sustancia es capaz de ser antagonista del receptor hormonal; III) la sustancia altera la expresión génica del receptor hormonal; IV) la sustancia altera la transducción de la señal química iniciada por el receptor hormonal; V) la sustancia induce modificaciones epigenéticas que afectan a la producción hormonal o a la sensibilidad hormonal de las células; VI) la sustancia altera la síntesis hormonal; VII) la sustancia altera el transporte de la hormona a través de las membranas celulares; VIII) la sustancia altera la distribución o los niveles circulantes de hormona; IX) la sustancia altera el metabolismo y/o el reciclado de la hormona; X) la sustancia altera, en un estadio de

desarrollo, el destino anatómico de las células productoras de hormonas o de las células que han de responder a ellas.

Con lo que hemos visto hasta ahora, ya hay evidencia de que el glifosato interactúa y activa los receptores de hormonas esteroideas, altera su expresión y que altera la transducción de la señal química que inician. Hemos visto como, desde equinodermos hasta mamíferos se ve alterada la síntesis de hormonas esteroideas o cómo se alteran los niveles hormonales en mamíferos. Además, Janaina Sena de Souza *et al.* (2017) ha demostrado que, a concentraciones elevadas (5-50mg/Kg/día), Roundup® Transorb produce un alteración de la “homeóstasis tiroidea” a través de la modificación de la expresión génica de los reguladores hormonales de la tiroides que se producen en el hipotálamo en ratas Wistar. Por su parte, Duforestel *et al.* (2019), demuestra que el glifosato produce la alteración epigenética de algunos tipos celulares (células de mama, en este estudio) y que esta modificación las predispone a procesos tumorales en presencia de otros factores de riesgo.

Las instituciones encargadas de las decisiones políticas deberían sentir el peso de la evidencia como ahora mismo puede sentirlo el lector.

The Monsanto Papers revela el Espionaje de Bayer-Monsanto y la guerra sucia contra el ciudadano organizado.

El caso “Lee” abrió las puertas judiciales y periodísticas a los cofres del tesoro que guardaba Monsanto en sus archivos. ¿Cómo se llegó a deshilar esta información y cómo funciona de forma general la rendición de cuentas medioambiental y sanitaria de las empresas en las sociedades capitalistas?

El sistema de autoregulación del modelo político anglosajón, también denominado “regulación basada en riesgos” (en un ejercicio bastante mediocre del uso de eufemismos), es el modelo hegemónico en EE.UU. en los países de la *British Commonwealth of Nations*, en algunos países africanos y latinoamericanos (sobre todo aquellos que

han estado dominados recientemente por el “poder gringo”) y, cada vez más, en la Unión Europea. Son muchos los casos en los que se ha producido un enorme daño a la salud pública mediante este sistema y que solamente largos y costosos procesos judiciales han conseguido sacar a la luz, mientras la empresa seguía haciendo dinero. Esta forma de regular va ligada al concepto de Nueva Gestión Pública que, desde los años 1980, también se ha integrado en la forma de regular de la UE, y que recoge básicamente los conceptos neoliberales y los intenta aplicar a la gestión pública, siendo este además un proceso más fuerte en algunos países que en otros.

Carey Gillam en su libro cita el caso del *Oxycontin* (Oxicodona), el opiáceo con el que comenzó allá por el año 2000 la actual epidemia de sobredosis que, en el “país de la libertad”, está segando vidas²³⁶ a razón de 100.000 personas al año y que actualmente se basa en otro opiáceo denominado Fentanilo; o el caso de General Motors y su negativa a reforzar el chasis de sus coches y camiones a sabiendas que éstos no eran lo suficientemente resistentes. Y añadimos aquí: La película *Dark Waters* (2019) relata un proceso similar con la producción de teflón por parte de la empresa Du Pont y cómo, de su rentable uso militar durante la segunda guerra mundial, se pasa a un más que lucrativo uso en utensilios de cocina y otros enseres domésticos. Todo ello, pese a que la empresa poseía experimentos internos que demostraban su toxicidad para humanos. Y para, sin ningún tipo de miramiento, verter los residuos de su producción al medio ambiente en condiciones de completa inseguridad ambiental. La película narra a la perfección todo este sistema de autorregulación que es obviamente explotado por el capital para, por un lado, socializar las “externalidades” del proceso de reproducción del capital, y por otro, que para que el público conozca los documentos internos de la empresa, debe darse una dura batalla judicial para hacerlos públicos. El sistema perfecto de transparencia y honestidad que toda democracia se merece, ¿no? 30 años de cánceres,

²³⁶ Para leer más sobre la epidemia de opiáceos en EE.UU. se puede consultar “*El imperio del dolor. La historia secreta de la dinastía que reinó en la industria farmacéutica*” de Patrick Radden Keefe, publicado en castellano por Reservoir Books y en català por Edicions del Periscopi.

muertes (y muchos beneficios para unos pocos accionistas) para que todo acabe en unas irrisorias multas y una película que lo narre todo.

El equipo legal de “Lee” tuvo que enfrentarse a batallas similares a las que se dramatizan en *Dark Waters* allá por 2016. Monsanto tenía en su poder miles de correos electrónicos, documentos, pruebas de laboratorio y otras evidencias que consideraba “secretos” porque afectaban, según decían, a asuntos relacionados con sus patentes. El equipo legal consideraba que, saber si los responsables científicos de la empresa sabían, o no, del posible potencial cancerígeno de sus productos comerciales, como el Roundup o el Ranger Pro, no era ningún secreto comercial, sino una información esencial que cualquier ciudadano tenía derecho a conocer. Además, la información relativa a espionaje de activistas por los derechos humanos o a la fabricación de pruebas falsas en revistas científicas de prestigio que apoyaran la seguridad de los preparados comerciales de Monsanto, como parece obvio, tampoco podía considerarse “secreto comercial”. De esta manera fue como un juez de California otorgó derecho al mundo a conocer los “*Monsanto Papers*”.

De forma paralela, el periodista de France 2 y Le Monde Danielle Rouquié²³⁷ reveló que, durante 2016, Monsanto había estado espionando a más de 200 personalidades políticas, periodísticas y científicas del país de la revolución más icónica. Y lo había hecho por el simple hecho de haberse posicionado contra los efectos nocivos para la salud del herbicida glifosato. Su red de espionaje se extendió por todo el mundo, llegando a organizar campañas de desprestigio y contrainformación contra el cantante Neil Young, que se había mostrado muy combativo contra el uso de este herbicida, y contra la propia Carey Gillam que estaba a punto de publicar su primer libro sobre los Monsanto papers²³⁸, “*Whitewash: The Story of a Weed Killer, Cancer, and the Corruption of Science*” (2017).

237 La información fue distribuida en forma de pieza informativa por la agencia Reuters. Disponible en <https://www.reuters.com/article/france-pesticides-monsanto-idFRL5N22M1ZG/> y consultada por última vez el 19 de agosto de 2024.

238 Información recogida por Sam Levin para The Guardian el 8 de agosto de 2009. Disponible en <https://www.theguardian.com/business/2019/aug/07/monsanto-fusion-center-journalists-roundup-neil-young> y consultado por última vez el 19 de agosto de 2024.

Monsanto ya tenía experiencia en el espionaje de activistas por los derechos humanos y por el planeta. En 2010, uno de los semanarios con más historia de EEUU, y que ha conseguido mantener su independencia de grandes grupos financieros, *The Nation*, tuvo acceso a información interna de la empresa de seguridad privada más grande del mundo: Blackwater. En esta documentación encontraron que “*han brindado servicios de inteligencia, capacitación y seguridad a gobiernos estadounidenses y extranjeros, así como a varias corporaciones multinacionales, incluidas Monsanto, Chevron, Walt Disney Company, Royal Caribbean Cruise Lines y gigantes bancarios Deutsche Bank y Barclays*”. En concreto, se puede leer en el artículo firmado por Jeremy Scahill lo siguiente:

“Blackwater, a través de Total Intelligence, buscó convertirse en el «brazo de inteligencia» de Monsanto, ofreciendo proporcionar operativos para infiltrarse en los grupos activistas que se organizan contra la empresa multinacional de biotecnología. (...) Según las comunicaciones internas de Total Intelligence, el gigante de la biotecnología Monsanto, el mayor proveedor mundial de semillas modificadas genéticamente, contrató a la empresa en 2008-2009. La relación entre las dos empresas parece haberse solidificado en enero de 2008 cuando el presidente de Total Intelligence, Cofer Black, viajó a Zúrich para reunirse con Kevin Wilson, gerente de seguridad de Monsanto para asuntos globales (...).”

Esta empresa de mercenarios, y sus filiales, se estaban convirtiendo en el servicio de inteligencia de la multinacional... y la relación no terminó en 2009. La actividad de esta empresa pareció basarse en la recopilación y análisis de información sobre grupos de activistas en Latinoamérica durante los años siguientes. La guerra sucia contra la ciudadanía organizada llegó hasta la ONG *United States Right To Know* (USRTK) o, incluso, al propio informe de la *Agencia Internacional de Investigación sobre el cáncer* (IARC por sus siglas en inglés), un organismo dependiente de la OMS, que emitió un informe en 2015 donde se clasificaba el herbicida glifosato en su forma pura (y no mezclado con coadyuvantes como ocurre en los preparados comerciales) como “*probablemente cancerígeno para los seres humanos*”. En este informe, llegó a documentar Kate Kelland (2017) para Reuters, “*se encontraron 10 cambios significativos que se realizaron entre el borrador del capítulo sobre*

estudios con animales y la versión publicada de la evaluación de glifosato de la IARC. En cada caso, una conclusión negativa acerca de que el glifosato provoca tumores fue eliminada o reemplazada por una neutral o positiva”.

Esta guerra sucia incluyó la contratación de científicos para la realización de campañas públicas de desprestigios a los argumentos de las ONG, la acción judicial de la ciudadanía demandante, los artículos científicos publicados que demostraban los potenciales efectos perversos del herbicida sobre la fisiología de los mamíferos (y que ya se contaban por miles). En varios de los documentos conseguidos durante la batalla judicial contra el gigante (*The Monsanto Papers*) se ve esta conexión entre altos directivos de la multinacional y personal científico de diversas universidades. En el siguiente punto vamos a tratar esta conexión de Bayer-Monsanto con la academia y cómo la empresa ha utilizado su *network* de becarios y asalariados para crear una tupida red de apoyo en caso de emergencia. Es una especie de lobbying, destinado eminentemente a la construcción de campañas públicas de imagen que permitan un estado de la opinión pública favorable a la permanencia del herbicida en el mercado de pesticidas. Citemos, por ejemplo, al digital *Político*. En una crónica escrita por Simon Marks (2017) se afirma que *“un correo electrónico de 2015 escrito por William F. Heydens, un ejecutivo de Monsanto, en el que le decía a otros altos ejecutivos de Monsanto que «escribieran de forma fantasma» la investigación sobre el glifosato, contratando para ello académicos que se prestaran a poner su nombre a investigaciones que habían sido realmente realizadas por Monsanto”.*

Volvamos a fechas más recientes. Veamos cómo fue la batalla legal contra la multinacional, primero de matriz estadounidense y, posteriormente, de matriz alemana²³⁹.

El primero de los juicios contra Monsanto, como hemos visto, fue el de Dewayne Anthony “Lee” Johnson. Pese a las maniobras de la

²³⁹ Toda la información, la documentación legal obtenida y análisis legales de la misma, están disponibles en la web de la ONG estadounidense *United States Right To Know (USRTK)*. Disponible en <https://usrtk.org/monsanto-papers/>

multinacional de intentar compartimentalizar la causa en dos juicios y evitar que el jurado pudiera ver la mayor parte de la información disponible en los *Monsanto papers*, el jurado declaró que el “factor sustancial” para el desarrollo del Linfoma No-Hodgkin terminal que acabaría poco después con la vida de “Lee” fue el preparado comercial de Monsanto. La indemnización fue fijada en 290 millones de dólares, rebajada posteriormente por el juez a 39 millones. Tras diversas peleas judiciales por incrementar esta indemnización, por los representantes de “Lee”, y de anular la causa, por parte de Monsanto, la causalidad quedó suficientemente acreditada en los recursos y la causa permaneció. Eso sí, la indemnización nunca se elevó. De hecho, bajó a un total de 21 millones. Que el cáncer no impida la reproducción del capital.

El segundo juicio que enfrentaba a Monsanto contra el cáncer, y que fue el primero en llegar a la corte Federal de EEUU, lo llevó adelante Edwin Hardeman, un jardinero aficionado que utilizó Roundup® para controlar la propagación de hierbas no deseadas en sus propiedades durante más de 3 décadas. La estrategia de la empresa fue similar: intentar primero dividir la causa y, luego, anularla. También fue similar el resultado: quedó acreditado que el producto Roundup fue la “causa sustancial” del Linfoma No-Hodgkin que padecía también Edwin.

El tercer juicio contra Monsanto terminó en su fase de jurado en mayo de 2019. Alva Pilliod y Alberta Pilliod habían rociado su propiedad con Roundup®, pensado que era seguro como la compañía se había encargado de asegurar durante décadas. Ambas desarrollaron un linfoma No-Hodgkin. Las indemnizaciones iniciales fijadas por el jurado fueron elevadísimas, con un total de 2000 millones de dólares. Y como ocurrió en los dos anteriores casos, el juzgado las rebajó a un total de 87 millones. Hay dos cuestiones diferentes en este caso: I) el caso sirvió en 2022 para que, contra todo pronóstico, la Corte Suprema de EE.UU. desestimara un recurso múltiple realizado por Bayer-Monsanto y que buscaba desestimar decenas de miles de demandas interpuestas contra la empresa por los efectos causados por el Roundup y otros productos, y II) el caso ha sido llevado legalmente por el denominado “Consejo judicial de Roundup de California” (JCCP), un equipo legal que se ha especializado en este tipo de pleitos y que

ha permitido a muchas personas y grupos negociar con la empresa desde una posición de fuerza.

Por esta razón, según el *Lawsuit Information Center*, hasta julio de 2024 Bayer-Monsanto había llegado a acuerdos de conciliación en más de 100.000 casos. ¡Cien mil! En total, la empresa habría pagado más de 11.000 millones de dólares estadounidenses para cerrar estos acuerdos lo que nos da un promedio de 110.000 dólares por acuerdo. ¡Qué lejos está esto de las decenas de millones que tendría que haber pagado si cada caso hubiera llegado a la última instancia condenatoria! Y pese a todo ello, en fecha de agosto de 2024 todavía se estiman en más de 54.000 causas abiertas contra la multinacional²⁴⁰.

El asunto Séralini. Ejemplo de *lobbying* en la ciencia

Imaginemos la siguiente historia. Desde hace décadas, la cantidad y calidad de la investigación que demuestra la vinculación entre modelo productivo (capitalismo), aumento de las emisiones de CO₂ y el incremento rápido y súbito de la temperatura media del planeta tierra, es abrumadora. Hay literalmente decenas de miles de trabajos de investigación que demuestran este vínculo causal. La inmensidad de la carga de prueba es tal que cualquier humano formado para comprender esta información tardaría varias vidas en procesarla completamente. Sin embargo, desde hace unos años las empresas multinacionales (y algunos petroestados) dedicados a la producción de recursos energéticos fósiles (carbón, gas y petróleo) han decidido contratar a las personas que exitosamente consiguieron convencer durante unos años a nuestras sociedades de que fumar no era tan malo. Y la estrategia de este grupo de comunicación no fue otra que la creación, alimentación y financiación de información falsa, investigaciones falsas y de comuni-

²⁴⁰ Podemos consultar toda esta información de manera actualizada en el post realizado por Ronald V. Miller, Jr. para el Lawsuit Information Center, disponible en <https://www.lawsuit-information-center.com/roundup-lawsuit.html> y consultado por última vez el 21 de agosto de 2024.

cadore dispuestos a decir lo que sea con tal de engordar los números de sus cuentas bancarias²⁴¹. No les ha ido mal. Algunos estudios de opinión muestran que, aunque la posición de “negacionista del cambio climático” aún es minoritaria, ha crecido espectacularmente sobre todo en países de un elevado PIB, muy probablemente impulsado por el fenómeno reaccionario que está viviendo el mundo cuando estas líneas son escritas. Por ejemplo, Lara Lázaro Touza *et al.* (2023) afirma que “*el negacionismo climático ha aumentado en España, especialmente en personas situadas más a la derecha en el espectro ideológico. No obstante, dicho fenómeno sigue siendo muy minoritario*”.

¿Es posible que Monsanto organizara algo similar? Vamos a detallar el que se ha denominado “Asunto Séralini” y vamos a comprender a la perfección la capacidad que tiene una multinacional que factura anualmente más de 45.000 millones de euros para, efectivamente, inundarlo todo con sus *Fake News*.

Todo empieza con la figura de Gilles-Éric Séralini. Este biólogo de la Universidad de Caen (Francia) fundó en 1999, junto a Corinne Lepage (abogada y exeurodiputada por el partido *Cap21* y actual presidenta del mismo²⁴²) y Huglo Lepage (abogado), fundó el *Comité de Recherche et d'Information Indépendantes sur le Génie Génétique* o CRIIGEN. Esta ONG, como todas, tiene una “misión”. Según la web de CRIIGEN esta ONG “*es una asociación sin ánimo de lucro, independiente de las empresas biotecnológicas y químicas, que estimula la investigación para comprender mejor los efectos de los contaminantes sobre la salud y el medio ambiente, y su desintoxicación. Nuestros miembros realizan estudios científicos, peritajes y contraperitajes para comprender y analizar mejor los riesgos para la salud de las biotecnologías, en particular los OMG y sus pesticidas asociados*”. Si Séralini, en lugar de haber fundado una ONG en el ámbito de la ecotoxicología, la hubiera fundado en el ámbito de la climatología, sus investigaciones no habrían podido ser atacadas de la manera en la que lo fue la suya en su conjunto (o quizá sí). Este es el “conflicto de intereses” de Séralini.

²⁴¹ Sobre esta historia se puede consultar a Kelle Louaillier y Bill McKibben (2015).

²⁴² Desde 2021 el partido se denomina *Cap Ecologie*.

En noviembre de 2012 Séralini y su grupo de investigación de la Universidad de Caen publicaron un trabajo en la importante revista *Food and Chemical Toxicology* (FCT). Una revista que revisa sus trabajos de la forma habitual en la comunidad científica: el estudio es aceptado por el equipo editorial y enviado a dos o más personas expertas en el tema que, de forma anónima, critica, rebaten y complementan el estudio. Lo que se denomina *Peer review* o revisión por pares. El estudio pasó este filtro pero, sin saberlo, había creado las condiciones para la tormenta perfecta.

El trabajo utilizó ratas albinas Sprague-Dawley a las cuales se alimentó con maíz modificado genéticamente resistente a Roundup, de nombre comercial NK603, y comercializado por Monsanto. Observaron un incremento significativo en la tasa de tumores de las ratas que fueron alimentadas con este maíz. Recordemos que este maíz resistente a Roundup® habrá sido tratado frecuentemente con el herbicida para eliminar a las plantas competidoras del campo.

En el primer tercio de 2013 llegaron un total de 17 cartas al editor y comentarios al trabajo de Séralini *et al.* (2012). 15 de ellas criticando el trabajo, mientras que una de ellas daba apoyo a las evidencias expuestas sobre el potencial carcinogénico del Roundup y, por tanto, de la comida con restos del herbicida y la otra era de los propios autores del trabajo replicando a cada una de las cartas y comentarios recibidos por la revista. Lo mejor de la comunidad científica es que, al final de cuentas, todo se hace con luz y taquígrafos y es bastante sencillo seguir “el rastro del dinero” como diría Lester Freamon en *The Wire*. ¿Preparados para este viaje?

Las cartas al editor de *Food and Chemical Toxicology*

La primera carta a Wallace Hayes, por aquel entonces editor jefe de *Food and Chemical Toxicology*, está firmada por Robert Wager. Las principales críticas de Wager (2013) al artículo de Séralini son tres: A) el bajo número de animales utilizados y, por tanto, la baja

confiabilidad estadística del resultado: B) el tipo de rata utilizada, las Sprague-Dawley, tendentes a desarrollar más tumores que otras cepas; C) los problemas éticos que planteaba el estudio, argumentado un supuesto ensañamiento con los animales de investigación al permitir un crecimiento excesivo de los tumores. En general, estas críticas se repiten en casi todas las cartas al editor de la revista. La Carta de Wager va apoyada por otras firmas.

Podemos argumentar a favor de estas críticas y en contra. Hay una amplia bibliografía que examina las tasas de tumores en las Sprague-Dawley y en ratas Wistar. Hay una amplia bibliografía, tanto en toxicología como en investigación biomédica (en biología molecular en general) que utiliza ambas cepas de ratas. Se pueden discutir si las herramientas estadísticas son las adecuadas, o si hay ensañamiento metodológico. Todo es discutible y hay argumentos a favor y en contra. El blog sobre ciencia y poder, La Paradoja de Jevons, escribió en 2021 que “*aunque se tomen medidas para evitar el sufrimiento durante el manejo en la experimentación animal, estamos muchas veces sometiendo al animal a un estrés y a un sufrimiento innecesario que, si lo aplicáramos al ser humano, no dudaríamos en denominarlo tortura*”.

Pero al discutir sobre los argumentos y la calidad de las pruebas empíricas presentadas nos perdemos la verdadera información relevante de este caso. Robert Wager es, en el momento de escribir estas líneas, Expert Ambassador de *GMO Answers*, un *think tank* fundado por *CropLife International*, un lobby formado por BASF, Bayer, Syngenta, FMC, Sumimoto Chemical, Coreva Agriscience (antigua Du Pont). En la web personal de Wager podemos leer que es “*un científico independiente sin conexión financiera con la industria biotecnológica*”. A lo largo de su carrera ha firmado bastantes artículos, en tono bastante beligerante, contra el movimiento ecologista. Por ejemplo *Greenpeace's Vile War on the Poor and Vulnerable* escrita en 2023 junto a Henri I. Miller, argumenta de forma demagoga contra el ecologismo por posicionarse en contra del arroz dorado, único cultivo transgénico dedicado supuestamente a solucionar un problema de salud (ceguera por déficit de retinol)

y que, paradójicamente, nunca ha conseguido pasar la fase de “producción meramente residual” debido, entre otras cuestiones, a que su prometida vitamina A nunca permanecía el suficiente tiempo en el grano de arroz como para que su ingesta solucionara el problema de salud. A todas luces el arroz dorado fue utilizado como herramienta comunicativa. Sin embargo, lo más doloroso intelectualmente es que escribieran semejante barbaridad en 2023 cuando la evidencia en contra de las supuestas virtudes del arroz dorado ya es abrumadora.

Ninguna de estas vinculaciones con la agroindustria o con su oposición al movimiento ecologista aparecen citadas en la carta al editor. Pero sigamos. El caso de Wager no es el más sangrante. David Edward Tribe (2013) hace también una crítica metodológica al artículo de Séralini, aunque carga la artillería con lo que respecta “a la más que acreditada seguridad” de los productos elaborados a partir OMG y cómo la legislación europea y estadounidense fija una regulación adecuada para garantizar que todo el proceso de producción de OMG y su traslado a la cadena alimentaria garanticen su seguridad. No lo dudamos. La regulación y el control por parte del poder legislativo nunca ha fallado a la ciudadanía (léase con ironía). Sin embargo Tribe oculta que, al igual que Wager, figura como *independent expert* de *GMO Answers*. En 2010, trabajando para la Universidad de Melbourne (Australia), funda junto a Bruce Chassy (por aquel entonces profesor emérito de la Universidad de Illinois, EE.UU.) *Academics Review*. La web de esta empresa bipersonal aseguraba, en 2018, que *Academics Review* “solamente aceptaban donaciones de fuentes no corporativas”. Según los extractos de los registros fiscales de los años 2013 a 2016 de esta empresa en EE.UU., y desvelados en 2018 por Stacy Malkan para USRTK y por la periodista de la radio pública de Chicago (WBEZ) Monica Eng, habrían recibido 650.000 \$ de la agroindustria y que, personalmente, Chassy, habría recibido 57.000 \$ de Monsanto.

Otra de las cartas enviadas al editor de FCT está firmada por Erio Barale-Thomas (2013). Sus argumentos para desprestigiar el contenido del artículo de Séralini son divertidos: además de hacer

hincapié en los tres argumentos básicos comentados anteriormente, le duele especialmente que no esté escrito en un inglés adecuado y que Séralini sea el fundador de CRIIGEN.

“Gilles-Eric Séralini, es el presidente del Consejo Científico de CRIIGEN y, habiendo sido el CRIIGEN un apoyo importante del estudio, nos parece que esto debería haber sido revelado. En cuanto al inglés, varios colegas angloparlantes nativos se quejaron de la dificultad de leer el texto debido a numerosos errores graves de expresión: consideramos que los revisores de la revista podrían haber alertado a los autores sobre este punto”.

No debió leerse el apartado de agradecimientos del artículo de Séralini y la propia filiación del autor principal: “Agradecemos a Michael Antoniou por su ayuda en inglés y sus comentarios constructivos sobre el manuscrito, así como a Herrade Hemmerdinger por la corrección de pruebas. Agradecemos a la Asociación CERES, a la Fundación Charles Leopold Mayer pour le Progrès de l’Homme, al Ministerio de Investigación de Francia y a CRIIGEN por su importante apoyo”. Lo que sí se le olvidó a Barale-Thomas incluir en su carta al editor es que, desde 2003 trabaja para *Johnson & Johnson* y para *Janssen R&D* (trabajo éste último que dejó en 2022) y que, de 1998 a 2003 trabajó para Monsanto, según su currículum público en LinkedIn (ambas empresas tienen intereses en la industria agroquímica). Pese a ello, escribe la carta como presidente de la *Société Française de Pathologie Toxicologique* (SFTP). Hay personas que demuestran ser capaces de romper cualquier “hipocresiómetro”.

La que podríamos denominar “cuarta” carta la editor de FCT la firma Anthony Trewavas (2013). Cuarta carta y cuarto firmante que no rellena el apartado de “conflicto de intereses” aunque, hay que reconocer que, en el caso de Trewavas, sus conflictos de intereses son mucho más inconfesables. Según publicó The Guardian²⁴³ en 2001, Trewavas escribió un artículo difamatorio

²⁴³ El artículo se cita en las referencias con la autoría de “Redacción” debido a que no va firmado por ningún redactor en concreto.

contra Greenpeace en el diario escocés *The Herald* que le costó una condena judicial al periódico. Acusó a la ONG de estar organizando “campañas de extorsión”. Por aquel entonces Trewavas era un hombre ocupado: era un miembro destacado de la *Royal Society* y asesor científico en asuntos relacionados con los OMG del gobierno laborista de Tony Blair. Desde esta posición pública, según afirma el periodista Jonathan Matthews, se dedicó a construir campañas de guerra sucias contra aquellas personas activistas y científicas que se habían posicionado contra los OMG y los pesticidas. En 2002 organizó el argumentario y la estrategia para una campaña en foros y webs que utilizó la creación de perfiles falsos para difundir argumentario en favor de los productos elaborados por Monsanto. Casi podríamos considerar a Trewavas el primer ancestro de *Atlas Network*²⁴⁴. En 2001 contribuyó a la primera retirada de un artículo de la revista *Nature* de toda su historia, ejerciendo presión sobre el comité editor de la prestigiosa revista y, previamente, en 1997 participó activamente en el desprestigio de otra investigación. Ambos trabajos versaban sobre los OMG.

Vamos ambos casos de forma algo más detallada. El conocido como “asunto Pusztai” (que podemos considerarlo como un precedente y casi como un antecedente del asunto Séralini). En 1996, como hemos visto, la tecnología de cultivo basada en OMG ya era hegemónica para la soja en EE.UU. Sin embargo, según Domingo (2007), previamente a esta fecha no se había realizado ningún estudio revisado por pares que investigara a nivel de seguridad alimentaria los OMG. Tras un acuerdo económico con el bioquímico de Cambridge, John Gatehouse, y la empresa a través de la cual explotaba los beneficios de la patente

244 Para conocer cómo ha funcionado durante los últimos años *Atlas Network* y, en general, la expansión de bulos y *Fake News* en redes sociales con fines políticos se puede consultar la ingente investigación realizada por Julián Macías y su equipo de Pandemia Digital. Una pequeña pincelada la podemos encontrar en un artículo escrito por Pablo Iglesias en la revista *Ctxt*, *Las campañas de desinformación en redes están coordinadas con medios y con políticos de Vox, PP y Cs*, en <https://ctxt.es/es/20220201/Politica/38573/julian-macias-pandemia-digital-fake-news-redes-sociales.htm>

de las patatas rojas *Desiree*, el *Instituto de Investigación Rowett* fue el encargado de realizar una investigación sobre la seguridad de este producto para la alimentación animal (y potencialmente la humana) y, para ello, se congregó a un equipo combinado de personal del Instituto Escocés de Investigación sobre Cultivos, el Departamento de Biología de la Universidad de Durham y del propio Instituto Rowett, coordinados por Árpád Pusztai.

Las patatas *Desiree* habían sido modificadas genéticamente para que expresaran la *aglutinina Galanthus nivalis* (GNA). Las aglutininas son unas proteínas globulares esenciales para múltiples funciones vitales²⁴⁵. En este caso, esta aglutinina de la planta *Galanthus nivalis*, o campanilla de invierno, demostró experimentalmente ser eficaz como insecticida. Esto, potencialmente, haría que por ejemplo los grillo-topos se mantuvieran alejados del tubérculo.

Ewen y Pusztai (1999) publicaron en *The Lancet* un trabajo en el que mostraban que, tras alimentar 110 días ratas con estas patatas modificadas genéticamente, el espesor del epitelio estomacal y la longitud de las criptas, (o “glándulas gástricas”) aumentaba significativamente con respecto a los controles. Las hipótesis sobre porqué esto ocurrió fueron diversas: los efectos de la aglutinina, el virus del mosaico de la coliflor (que puede afectar a las patatas y que podría producir esos efectos en el epitelio gástrico) el propio proceso de producción de las patatas *Desiree*, etc²⁴⁶. ¿Cuál fue el problema?

Que en el programa de entrevistas de Granada TV²⁴⁷ *World in Action* realizó uno de sus programas sobre el trabajo que se realizaba sobre las patatas *Desiree* entrevistando para ello a Árpád Pusztai que,

245 Inmunoglobulinas, sobre todo las de tipo G y M, hemoglobinas, muchos factores de crecimiento, algunos factores de coagulación, etc.

246 Se puede leer una revisión general sobre la ingeniería genética de las patatas en María del Mar Martínez-Prada *et al.* (2021). La revisión incluye un análisis general de las hipótesis que explican los resultados de Ewen y Pusztai (1999).

247 Ahora denominada ITV Granada “es una productora y franquicia de televisión británica que forma parte del canal ITV. Está controlado por la compañía ITV plc y su área de transmisión cubre el noroeste de Inglaterra y la Isla de Man” según la entrada de la Wikipedia en castellano de la productora.

como director del proyecto, ostentaba también las responsabilidades comunicativas. No obstante, la entrevista fue autorizada por el directo del Instituto Rowett. En la entrevista realizada el 22 de junio de 1998, desvelaba de forma genérica los resultados del trabajo que tenían ya previsto publicar. El día previo a la emisión de la entrevista, el programa emitió una nota de prensa sobre lo que se iba a emitir. La reacción de la agroindustria y del *lobbie* que ya por entonces existía no se hizo esperar. Antes de la emisión del programa Philip James, el director del Instituto Rowett, ya había retirado a Pusztai como responsable de comunicación para, poco después como recoge James Randerson (2008) en *The Guardian*, suspender a Pusztai como coordinador, incautar sus datos por mala conducta, prohibirle hablar en público y no renovar su contrato. Una reacción de lo más comedida. La discusión posterior giró en torno a posibles confusiones en los comunicados de prensa y sobre qué línea de patata modificada se estaba utilizando. Otra vez aquí lo importante es ver lo rápido que actuó la agroindustria a través de su operador en este caso: el director del Instituto Rowett.

La prueba de que esto es una forma de *lobbying* es que el instituto auditó el trabajo a través de un panel de “expertos”, que incluyó al propio Pusztai, concluyendo que sus resultados estaban equivocados (una forma de humillación a Pusztai). Y Sin embargo, ese mismo año se publicaría en *The Lancet* el Ewen y Pusztai (1999). Absolutamente de locos. El 12 febrero de ese 1999 recogería *The Guardian* un *memorandum* firmado por otra pléyade de personalidades de la ciencia que afirmaba justo lo contrario. Aquí no somos equidistantes. Está claro quien atacó primero. Pero el intercambio de argumentos no responde a la evidencia. La evidencia la presentó Pusztai en *World in Action* desatando la “tormenta lobbie”²⁴⁸.

¿Os acordáis de la *Royal Society* donde Anthony Trewavas era uno de sus ilustres miembros? Pues una sociedad que se dedica a la promoción de la ciencia, iba a realizar una revisión por pares del trabajo como las que realizan las revistas. Paralelamente el trabajo fue enviado a *The*

248 El *memorandum* aparece firmado por más de 22 personas y en las referencias aparece bajo la abreviatura VV.AA. Como firma.

Lancet por Ewen y Pusztai. La “revisión por pares” de la *Royal Society* concluyó que los experimentos “estaban mal diseñados, contenían incertidumbres en cuanto a la composición de las dietas, analizaban muy pocas ratas, utilizaban métodos estadísticos incorrectos y carecían de coherencia” como recoge el propio Pusztai (2002). En este artículo de 2002 Pusztai argumenta que la *Royal Society* solamente había mirado los informes internos de la auditoría realizada por el Instituto Rowett, pero que no había analizado los datos brutos ni la metodología, simple y llanamente porque esos informes internos no incluían ni metodología ni datos experimentales.

Y tras este “escándalo mediático” aparece directamente el propio Trewavas. En su posición de asesor del gobierno británico, dinamizó la comisión parlamentaria “*Comité Selecto de Ciencia y Tecnología de la Cámara de los Comunes*” que acabó redactando un informe en el cual se exigía, por primera vez en la democracia de Reino Unido, que la cobertura de los medios de comunicación relacionados con la ciencia se rigiera por un estricto código de conducta en materia de precisión. Se acabó la libertad de expresión y de prensa. Paralelamente, desde la *Royal Society*, Trewavas promovió la creación de un listado de “científicos fiables” a los que los periodistas poco menos debían consultar a la hora de realizar crónicas sobre un determinado tema. Él, por supuesto, se reservó ser el “experto designado” para asuntos relacionados con los OMG. Todo quedaba resuelto.

Conquistó, además, un par de puestos más de “poder”: fue miembro del Comité Asesor sobre Modificación Genética (ACGM) del Reino Unido y formó parte del Consejo de Gobierno del *Centro John Innes*, el instituto de investigación biotecnológica de plantas más importante del Reino Unido. El Consejo de Gobierno tiene la responsabilidad de desarrollar, junto con el Director del centro (por aquel entonces Chris Lamb), la visión a largo plazo del instituto. Como veremos en la siguiente carta a la revista FCT, el Centro John Innes parece uno de los nodos del lobbying de la agroindustria en el mundo anglosajón²⁴⁹.

249 Para todos los datos sobre la conexión entre Anthony Trewavas y el asunto Pusztai puede leerse a Matthews (2001).

The Lancet, que como hemos dicho recibió la propuesta de artículo por parte de Ewen y Pusztai, publicó un editorial en 1999 tras conocer todo lo que había ocurrido y teniendo ya en sus manos la “revisión por pares” de la *Royal Society*. Es muy ilustrativo leer desde la actualidad este texto escrito en 1999 así que se reproduce a continuación prácticamente en su totalidad:

“Los cultivos modificados genéticamente, pese a que lo que hacen es ser menos susceptibles a las plagas, estos se promocionan como una solución a la baja producción de alimentos en los países en desarrollo. El motivo de estos promotores es el lucro, no el altruismo. Monsanto, uno de los mayores desarrolladores de cultivos modificados genéticamente, ha desarrollado un grano que da una mejor cosecha y es estéril por lo que, en lugar de guardar algunas semillas para la siembra del año siguiente, los agricultores deben volver al proveedor para obtener más.

En vista de este enfoque comercial desenfrenado de la modificación genética, tal vez no sea sorprendente que las empresas hayan prestado poca atención a los riesgos potenciales para la salud de los alimentos modificados genéticamente. Pero es asombroso que la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos no haya cambiado su postura sobre los alimentos modificados genéticamente adoptada en 1992 (...). Esta postura se adopta a pesar de buenas razones para creer que pueden existir riesgos específicos.

(...) En abril del año pasado, un científico, Arpad Pusztai, del Instituto de Investigación Rowett en Aberdeen, Reino Unido, anunció imprudentemente en televisión que los experimentos habían demostrado cambios intestinales en ratas causados por el consumo de patatas modificadas genéticamente. Dijo que él mismo no comería esos alimentos modificados y que era «muy, muy injusto utilizar a nuestros conciudadanos como conejillos de indias».

Una tormenta mediática cayó sobre Pusztai. Fue destituido de su cargo, sacrificio éste que no calmó la alarma pública en el Reino Unido ni en Europa. [Tras ello] la Royal Society había revisado lo que pudo

de las pruebas de Pusztai y sus colegas y las había encontrado defectuosas, un gesto de impresionante impertinencia hacia los científicos del Instituto Rowett, que deberían ser juzgados sólo por la publicación completa y final de su trabajo. La Asociación Médica Británica pidió una moratoria sobre la plantación de cultivos modificados genéticamente. El Gobierno del Reino Unido, de acuerdo con la tradición nacional, vaciló. Finalmente, el 21 de mayo [de 1999], el Gobierno presentó propuestas para la investigación de los posibles riesgos para la salud de los alimentos modificados genéticamente.

Los consumidores de toda Europa ya habían votado con los pies. A finales de la primera semana de mayo [de ese año], siete cadenas de supermercados europeas habían anunciado que no venderían alimentos modificados genéticamente. Tres grandes multinacionales de la alimentación, Unilever, Nestlé y Cadburys-Schweppes siguieron su ejemplo. El Tribunal Supremo de la India ha confirmado la prohibición de probar cultivos modificados genéticamente. En la India, los activistas han prendido fuego a campos de cultivo sospechosos de ser utilizados para realizar experimentos. La población de los Estados Unidos, donde hasta el 60% de los alimentos procesados contienen ingredientes modificados genéticamente, parece, hasta el momento, no estar preocupada.

La cuestión de los alimentos modificados genéticamente ha sido muy mal gestionada por todos los implicados. Los gobiernos nunca deberían haber permitido que estos productos entraran en la cadena alimentaria sin insistir en pruebas rigurosas de sus efectos sobre la salud. Las empresas deberían haber prestado mayor atención a los posibles riesgos para la salud y a la percepción que tiene el público de este riesgo; ahora están pagando el precio de esta negligencia. Y los científicos implicados en la investigación de los riesgos de los alimentos modificados genéticamente deberían haber publicado los resultados en la prensa científica, no a través de los medios de comunicación populares; sus colegas, por su parte, también deberían haber evitado emitir juicios sobre el tema sin tener a la vista todos los hechos.”

The Lancet es considerada una de las revistas más prestigiosas en temas relacionados con la salud. *The Lancet* terminó aceptando el trabajo de Ewen y Pusztai, bajo una revisión por pares de 6 expertos anónimos, 5 de los cuales consideraron el trabajo adecuado para su publicación con cambios mínimos en la elaboración de los datos. El trabajo tuvo que ser publicado con los datos que tenía en su poder Ewen ya que los datos de Pusztai habían sido vetados por el Instituto Rowett. El sexto experto anónimo que revisó el trabajo para de *The Lancet* no tardó en salir a la luz. En cualquier otra investigación revisada por pares jamás nos hubiéramos enterado de quien “está al otro lado”²⁵⁰. Sin embargo John Pickett, miembro también de la *Royal Society* y trabajador a sueldo de la agroindustria²⁵¹, no tardó en disparar contra *The Lancet* por haber aceptado el trabajo nada más y nada menos que en una entrevista concedida por la BBC, según recoge Martin Enserink (1999) en una columna para la revista *Science*.

Pero aquí no acaban los tentáculos de poder de Anthony Trewavas. También se involucró en la retractación del artículo de David Quist e Ignacio H. Chapela (2002). La década final de los años 1990 y los primeros años del milenio 2000 fueron intensos. Según documenta la revista *Nordfolk Genetic Information Network*²⁵², Trewavas habría sido la cabeza

250 Esto es matizable para áreas del conocimiento muy específicas donde el número de personas expertas es bajo.

251 Pickett trabajaba para el Institute of Arable Crops Research in Rothamstead, actualmente Rothamstead Research. Rothamstead Research firmó en 2017 con Bayer “un acuerdo marco estratégico para mejorar las colaboraciones en áreas científicas que respaldarán el desarrollo de soluciones agronómicas más personalizadas para los agricultores” según recoge Hopkins (2017) para Agrobussines global. En 2002 ya elaboraban informes técnicos para Monsanto como el de J. R. Newman *et al.* (2002).

252 La revista *Nordfolk Genetic Information Network* estuvo formada por Jonathan Matthews, el editor de NGIN; Claire Robinson: investigadora, archivista de NGIN y editoria de GMWATCH; Andy Rees: editor de The Weekly Watch, un semanario de NGIN’s dedicado al resumen de la actualidad relativa al debate de los OMG y, concretamente, a la actualidad relacionada con el Roundup; Nick Jackson, el contable de la organización. Tuvo vigencia entre el año 2000 y el 2003. Su archivo puede consultarse *online* [<https://ngin.tripod.com/nginlist.htm>]. Posteriormente, el equipo pasó a formar parte de GMWATCH. La información referente a Anthony Trewavas también puede consultarse en el archivo [<https://ngin.tripod.com/110802a.htm>].

pensante de la campaña de *lobbying* contra este artículo, activando su red de perfiles falsos en foros y webs, escribiendo un artículo de opinión (publireportaje) de Sygenta publicado en *Nature* tras la retirada del artículo de Quist y Chapela²⁵³ y firmando, posteriormente, otro artículo apoyando la puesta a punto de la tecnología de los OMG para que “*Malthus falle una y otra vez*” (Trewavas, 2002). La tormenta que se desató entorno al asunto fue similar al asunto Séralini, con envío de cartas al editor de *Nature* y presión mediática.

¿Cuál fue el pecado cometido por el artículo de estos investigadores de origen norteamericano y mexicano? Haber estudiado las variedades de maíz nativo de México. Variedades adaptadas localmente tanto a la climatología como a la cultura nativa²⁵⁴. Cuando lo hicieron, se dieron cuenta que existían algunas de estas variedades que habían incorporado algunos de los constructos que se utilizan para transfectar genes dentro de los OMG. Por ejemplo, para modificar el maíz y hacerlo productor de *toxina cry* (maíz Bt) capaz de acabar con la mayoría de los barrenadores²⁵⁵ que le afectan, se suele utilizar la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, a la cual se transfecta con un plásmido que contiene, entre otras cosas, como promotor el promotor de la nopalina sintetasa. Pues bien, Quist y Chapela encontraron este promotor en las variedades de maíz nativo en Oaxaca. Así resumen su trabajo:

“Los efectos directos sobre especies no objetivo y la posibilidad de transferir involuntariamente características de relevancia ecológica a las variedades locales y sus parientes silvestres también han sido fuentes de preocupación. El grado de conectividad genética entre los cultivos industriales y sus progenitores sacados de entre las variedades

253 Fue la pluma, pero no figura su autoría. Lo firma Henry Gee (2002), del consejo editorial de *Nature*. La composición del consejo que aprobó la publicación de este publireportaje de Sygenta fue la misma que decidió retractar el artículo de Quist y Chapela, pese a que la revisión por pares había sido exitosa.

254 Los organismos adaptados localmente, tanto a la cultura, como a la climatología y a usos particulares se denominan, de forma genérica Landraz.

255 Los barrenadores son artrópodos cuyas fases larvales están especializadas en alimentarse de los tejidos internos de la planta, ya sea del tallo, o de las hojas. Son los que más afectan al maíz.

locales y sus parientes silvestres es un determinante principal de la historia evolutiva de los cultivos y los agroecosistemas en todo el mundo. Las recientes introducciones de constructos de ADN transgénico en los campos agrícolas proporcionan marcadores únicos para medir dicha conectividad. Por estas razones, la detección de ADN transgénico en las variedades locales de cultivo es de importancia crítica. En este artículo informamos sobre la presencia de constructos de ADN transgénico introgresadas²⁵⁶ en variedades locales de maíz nativas cultivadas en montañas remotas de Oaxaca”²⁵⁷.

Para hacernos una idea de la hipocresía de la campaña mediática lanzada por la patronal agroindustrial, vemos que paralelamente a la retirada de este artículo de *Nature*, los gobiernos de medio mundo legislaban y establecían que la presencia de este promotor, y de otras partes del constructo de ADN transgénico utilizado en plásmido, en especies no diana como un marcador de riesgo potencial (por ejemplo cf. Comisión Nacional de Bioseguridad, 2019). Tanto para los revisores, como para cualquier observador imparcial, el *paper* de Quist y Chapela era buena ciencia. Para los decisores públicos parece que también. Y es obvio que cualquier persona de empresa, de la política o de la ciudadanía vería en este trabajo un trabajo realista, ocupado en lo mejor para todos. Sin embargo tenía en su seno un pecado original: mala prensa. Y la mala prensa es contraproducente para la reproducción del capital.

La prueba más evidente de todo ello es que: I) el artículo se acabó readmitiendo, II) los controles de las plantaciones ilegales (plantaciones pirata sería un término más adecuado quizá) que serían el probable origen de estas hibridaciones se redoblaron, III) no se volvieron a encontrar estos indicadores de riesgo y IV) siguen estableciéndose como puntos de control para cualquier plantación de OMG en estadio de desarrollo.

Pero el asunto Pusztai y el artículo de Quist y Chapela siguen quedándose cortos con el asunto Séralini. Otra persona ligada al *Centro John*

256 La introgresión es un tipo de transferencia genética que ocurre entre especies diferentes como consecuencia de la hibridación entre esas especies. Forma parte del subtipo de transferencias genéticas denominadas horizontales.

257 En la traducción se ha cambiado la palabra raza por la palabra variedad.

Innes, Dale Sanders, es la primera firma de la quinta carta al editor del FCT. Junto a otras tres personas, Sanders *et al.* (2013) vuelve a recitar las principales críticas al artículo de Séralini *et al.* (2012), añadiendo quizá una interesante novedad: la posibilidad de la contaminación del maíz transgénico con isoflavonas provenientes de otros cultivos, como la soja. Sin embargo, la presencia de isoflavonas en el maíz es utilizada como un ataque a la metodología de medición del estudio. Las isoflavonas no deberían estar en el maíz. Como veremos en el caso de la carta de Pilu (2013), las contaminaciones alimentarias existen también en los OMG y su pretendido mayor control de calidad es solamente eso, pretendido.

Por lo demás a Sanders se le olvida apuntar algunos conflictos de intereses en esta carta. Es cierto que sí nombra su afiliación al John Innes en calidad de director. Pero en calidad de director, la filial para la firma de contratos con otras organizaciones fuera de Reino Unido, la *John Innes Enterprise Limited* (fundada en 1990), llegó a un acuerdo en 2011 con el *Malaysian Genomics Resource Center Berhad* (MGRC) para, en palabras de Sanders, “que la colaboración beneficie a la agricultura de Malasia al aumentar el acceso a la ciencia vegetal y microbiana para la mejora de los cultivos tropicales (...). La investigación conjunta también ayudará al país a aprovechar el potencial de su biodiversidad al identificar productos naturales que podrían utilizarse en el sector de los bioactivos”²⁵⁸. Sanders no se incluyó como directo de la *John Innes Enterprise Limited*. Sanders es una persona ligada orgánicamente a la producción e investigación en OMG. Además, su afinidad es también ideológica, como lo demuestra sus recientes posicionamientos en favor de que la UE regule positivamente el uso del CRISPR-Cas9 como fórmula legal de “saltarse” las actuales regulaciones que limitan el uso de OMG en la unión²⁵⁹.

258 Información recogida por ISAAA Inc, en su semanario *Biotech updates*, publicado el 25 de febrero de 2011 y disponible aquí [última consulta 10/09/2024] <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=7425>

259 Sanders es un firmante, junto a 125 plumas más, de la carta dirigida a la Comisión Europea en 2019 y que buscaba ejercer presión mediática en favor de la regulación de la tecnología de edición genética CRISPR-Cas9 [disponible en <https://www.jic.ac.uk/press-release/european-science-community-urges-rethink-on-genome-editing/>]. Esta tecnología es fascinante, pero la exactitud y la biología

La sexta carta al editor de FCT está firmada por Bruce Hammond, Daniel A. Goldstein y David Saltmiras que recogen, otra vez, los argumentos genéricos de crítica al artículo de Séralini, haciendo hincapié con abundante bibliografía en la seguridad del glifosato. Uno lo comprende todo cuando, esta vez sí, va al escueto apartado de conflicto de intereses de esta carta: “los autores son empleados de Monsanto”. Se agradece la honestidad en Hammond *et al.* (2013).

La séptima carta está escrita por Colin Berry en la cual se vuelve a repetir el argumentario: metodología, cepa de ratas utilizada, análisis estadísticos, etc. Pero esta no es una carta más del asunto Séralini. Según se pudo saber tras la divulgación de *The Monsanto Papers* gracias al trabajo del equipo legal en el caso de “Lee” Johnson, entre los documentos aportados por Monsanto aparecía el nombre de Colin Berry. Tras la publicación de Séralini *et al.* (2012), se produjeron una serie de intercambios de correos. El *paper* de Séralini y sus colegas fue publicado el 20 de septiembre de 2012. El día 21 de septiembre Colin Berry envió un correo a David Saltmiras (firmante de la anterior carta al editor de FCT y empleado de Monsanto) preguntado qué debía decir sobre el tema²⁶⁰. ¿Existe mejor ejemplo de lo que es el lobbying?

son dos conceptos excluyentes. La biología es una ciencia estadística. No existe la intervención pulcra y perfecta 100% segura. Siempre hay una distribución estadística que abarca, desde el resultado deseado, hasta consecuencias no previstas. Por ejemplo, Xiao *et al.* (2024) recogen ejemplos de mutaciones no deseadas producidas por el proceso de edición genética mediante CRISPR. Afirman en el resumen de su *paper* que “La tecnología CRISPR/Cas9 ofrece las perspectivas más prometedoras como herramienta de edición genética en las investigaciones posgenómicas. Se convierte en una técnica que marcará una época por las características de velocidad y conveniencia de la modificación genómica. Sin embargo, aún no está claro si la edición genética CRISPR/Cas9 puede causar daños irreversibles al genoma” añadiendo que los efectos que ellos observan la mosca *Drosophila* “es de alcance genómico y está asociado con la estructura espacial entre cromosomas, en lugar de limitarse únicamente a la ubicación del gen”. Esto son palabras mayores.

²⁶⁰ Se puede encontrar más información en una entrada publicada por Andrew P. Han (2017) en Retraction Watch. Los correos intercambiados entre Colin Berry y David Saltmiras están disponibles aquí [último acceso el 10/09/2024] <https://www.wisnerbaum.com/documents/pdf/monsanto-documents/12-monsanto-email-confirming-companys-intimate-relationship-with-wallace-hayes.pdf>

Otro investigador implicado en este intercambio de correos es Andrew Cockburn el cual llega a decir literalmente que “*si puedes proporcionarme la munición, estaré encantado de responderte*”. Saltmiras responde lo siguiente:

“Wally Hayes, actual editor jefe de visión y estrategia de FCT, me envió un correo electrónico de cortesía esta mañana temprano. Espero que pronto podamos tener una conversación de seguimiento para tratar si la visión y estrategia de FCT fueron la prioridad en este artículo que pasó por el proceso de revisión por pares... y cuáles es esa visión y estrategia. También sospecho que este artículo puede ser en nuestro propio beneficio: la última palabra para los pocos vestigios de credibilidad científica que le quedan a Séralini”.

No, no hay mejor ejemplo de lobbying. Y no hay mejor prueba de que el asunto Séralini fue una campaña mediática organizada por la agroindustria y cuyos operadores fueron diferentes individuos y diferentes instituciones de la academia. Por lo que sea, este intercambio de correos se le pasó mencionarlo a Berry (2013) en el apartado de conflicto de intereses de su carta al editor de FCT.

Peter Langridge firma la octava carta. La afiliación que consta en la misma es el Centro australiano para la genómica funcional de plantas y el apartado de conflicto de intereses está vacío. Sus críticas se centran en lo metodológico, sobre todo en la estadística (sin entrar demasiado en detalle tampoco). Pero llama mucho la atención que Langridge (2013) se queje de que el artículo se halla publicado y acusa a FCT y/o al grupo de Séralini de haber puesto a disposición de “*grupos selectos*” la información del *paper* antes de su publicación. También critica el “*pobre trabajo editorial del texto*”. Uno nunca puede sentirse pobre si acude a todo tipo de congresos y actos, a mesa puesta (y habitación pagada), por la USDA, a *National Science Foundation* (NSF) de EE.UU. o el *Agricultural Biotechnology Council of Australia* (ABCA). En 2011 Langridge participa en “*Phenomics: Genotype to phenotype*”, un aparente congreso sobre biología evolutiva de plantas con ponencias muy sugerentes pero que, en su práctica totalidad, estaba copada por ponentes masculinos provenientes de la industria química y de la agroindustria. La financiación

del evento corrió a cargo de la USDA y la NSF. ¿Soft-lobbying? Langridge ha formado parte del *Scientifi panel* del ABCA. Esta organización es la patronal de empresas biotecnológicas australianas donde encontramos a *CropLife Australia*, *Australia Seed Federation* (ASF), *Australian Oilseed Federation* (AOD), *Ausbiotech*, etc. Lobbying de manual.

La novena carta está firmada por Lúcia de Souza y Leila Macedo Oda de ANBio – *Brazilian Biosafety Association*. Ambas eran directivas de ANBio (Vicepresidenta y presidenta, respectivamente). ANBio fue fundada en 1999 por *Bayer seeds LTDA*, *Cargill*, *Du pont do Brasil*, *Mon-santo*, *Pionner sementes LTDA*, *Novozymes* o *Coodetec*²⁶¹. ¿Y la crítica del artículo de Séralini y sus colegas? Souza y Macedo Oda (2013) se limitan a reproducir las críticas metodológicas expuestas.

La décima carta ya le hemos citado anteriormente. Está escrita por Roberto Salvatore Pilu y es, quizá, la única que presenta una crítica concreta que es verosímil. Las críticas metodológicas, como hemos dicho, son algunas lógicas, otras podrían aportar mejoras al trabajo (sería de mayor calidad), otras son genéricas (y por tanto inútiles), otras rebatibles y discutibles. En ningún caso doblegan las conclusiones del artículo. Sin embargo Pilu (2013) propone una hipótesis alternativa sobre la causa de los resultados observados. Para Pilu (2013) no se comprobó si el grano de maíz NK603 presentaba aflatoxinas. Esto es un punto de calidad crítico en el transporte de productos alimenticios. Las aflatoxinas y, en concreto, las fumonisinas, están asociadas al cáncer en humanos y en animales. Es una pregunta legítima la que se hace Pilu: ¿cuáles eran los niveles de aflatoxinas en ese maíz? ¡Ojo! Esto no deja de ser importante para aquellos animales que son alimentados por OMG o si en un futuro este tipo de productos vegetales es autorizado para alimentación humana. Sin embargo Pilu olvida recordamos sus conflictos de intereses. En 2009 formó parte del comité local de organización del XXI congreso internacional de la *European Association for Research on Plant Breeding* (EUCARPIA)

²⁶¹ Esta información está disponible en la entrada de *PowerBase* de ANBio, y puede consultarse además en la información descargada de la web de 2001 de ANBio, disponible aquí [https://powerbase.info/images/4/4a/Book_anbio1.pdf]. Actualmente no es posible consultar esta información en la web actual de ANBio.

titulado “*Maize and soghum breeding in the genomics Era*” y que fue financiado por la industria agrícola según puede consultarse en el propio informe resumen del congreso. Otro ejemplo: en 2022 participó en una serie de comunicaciones divulgativas organizadas por su alma mater, la Universidad de Milán (Italia) y pagadas por la patronal agrícola italiana, en las cuales se buscaba convencer a los agricultores italianos para el uso de OMG y que ellos mismos ejercieran de “sociedad civil organizada” para reclamar la relajación de las regulaciones sobre este tipo de cultivos²⁶².

La siguiente carta al editor de FCT está firmada por lo que podríamos denominar un “futbolista europeo” de la ciencia: Mark Tester. En los últimos años se ha visto un creciente número de personas que trabajan en la ciencia que son “fichados” por instituciones y Estados con una capacidad económica que difícilmente pueden igualar las universidades Europeas, por ejemplo. Ligado a este “movimiento de acercamiento al petróleo saudí” (podríamos denominarlo así) han salido a la luz múltiples casos de personal investigador que, buscando mejorar rápidamente su currículum, habrían cometido supuestamente fraude, falsas autorías de investigaciones, cohecho y otros delitos relacionados. Basta echar un vistazo, por ejemplo, a la denuncia presentada por el criminólogo Miguel Ángel Gallardo Ortiz ante el ministerio del interior español²⁶³ denunciando la llamada “Trama Saudí”. ¿Por qué citar todo esto en el caso de Mark Tester. Porque es una persona que se mueve básicamente por dinero y no por una ética profesional propia de la comunidad científica. En absoluto se está diciendo aquí que Tester esté cometiendo alguno de estos delitos, pero sí se le está asociando a una ética de la crematística y el

²⁶² El título de las jornadas era “Comunicazione nell’agroalimentare”. ¿Queda suficientemente claro la importancia que le da la agroindustria a la vertiente mediática de sus productos?

²⁶³ El texto completo de la denuncia, con todas las fuentes documentales que soportan los numerosos casos de supuestos delitos está disponible en la propia web del autor [https://www.miguelgallardo.es/fraudes-universitarios-firmado.pdf?trk=article-ssr-frontend-pulse_little-text-block], consultada por última vez el 12 de septiembre de 2024.

beneficio rápido. Y más si trabaja en la Universidad King Abdulah²⁶⁴ de Arabia Saudí.

Tester seguro que lo podría haber hecho mucho mejor en su crítica del estudio de Séralini. Citar una muy breve bibliografía y acudir a la falsa seguridad de los organismos reguladores como fuentes de autoridad es algo que está al alcance de cualquier tertuliano. De un experto en modificación genética de organismos para que éstos se adapten a condiciones limitadas o muy limitadas de agua se espera mucho más. En la fecha en la que Tester (2013) escribió la carta al editor de FCT trabajaba en el *Centro australiano para la genómica funcional de plantas* (Universidad de Adelaida, Australia). Tester se doctoró en 1984 por la Universidad de Adelaida y en 1988 por la Universidad de Cambridge (UK). En el año 2000 se tomó un año sabático, año que pasó trabajando para Monsanto UK LTD²⁶⁵. En 2002, y bajo el contexto del “asunto Pusztai”, protagonizó una polémica mediática al quejarse ostensiblemente sobre un documental sobre los OMG producido y emitido por la BBC²⁶⁶ en el cual había sido asesor científico. Según el no se habían

264 La *Kings Abdulah University* (KAUST) es una universidad cuyo presidente del consejo de administración es bin Salman bin Abdulaziz Al Saud, el principal sospechoso de haber organizado el asesinato del periodista saudí Jamal Khashoggi. Es también el príncipe heredero de la monarquía saudí y, por tanto, una de las personas más poderosas del mundo.

265 Es muy curioso comprobar cómo, tanto en el currículum disponible en su nuevo lugar de trabajo en la Universidad King Abdylah de Arabia Saudí, como en aquel disponible en los servidores de la Universidad de Adelaida, la referencia a Monsanto halla desaparecido. Sin embargo, gracias al perfeccionista y detallado sistema de información del Ministerio de educación ciencia e innovación de la república portuguesa podemos acceder a la versión completa del mismo y comprobar que, efectivamente, realizó esa “excedencia” durante un año para trabajar en Monsanto, consultada por última vez el 12 de septiembre de 2024 [<https://www.cienciavitae.pt/portal/en/D21A-8A80-14FF>].

266 El documental, de título “*Fields of Gold*”, fue emitido en 2002, y escrito por uno de los editores de The Guardian, Alan Rusbridger y por el novelista Ronan Bennett. The Guardian recogió la indignación de Mark Tester en una crónica publicada el 31 de mayo de 2002 y escrita por Matt Wells. Consultada por última vez el 12 de septiembre de 2024. [<https://www.theguardian.com/media/2002/may/31/broadcasting.gm>]

tratado los argumentos de forma ponderada y lo que se buscaba con la pieza documental era “*inflamar la histeria desinformada contra los transgénicos*”. En 2009 en *The Guardian* escribió una columna de opinión en la cual describía los OMG como una herramienta contra la pobreza.

La modificación genética para procesos biológicos complicados, como lo es el proceso de resistencia vegetal a la sequía, es mucho más difícil que la modificación de un organismo para que produzca una determinada sustancia (maíz Bt) o para que exprese una determinada versión de una proteína resistente a una sustancia tóxica (soja resistente a glifosato). Como escribe Jessica Leber para la *MIT Technology review*:

“Las cosechas de variedades biotecnológicas están presentes en el mercado desde la década de 1990, pero características como la resistencia a plagas o herbicidas son más fáciles de modificar porque implican a un único gen. La eficiencia de una planta para usar el agua y cómo se comporta ante el estrés provocado por la falta de agua son respuestas más complejas controladas por muchos conjuntos de genes y por distintas partes de una planta. Los factores medioambientales, como el momento del crecimiento en el que se produce la sequía, también influyen”.

Mark Tester lo está comprobando de primera mano. Sus cultivos resistentes a la sequía todavía no son una realidad comercial. Eso sí, por el camino se ha embolsado una buena cantidad de dinero.

La doceava carta al editor de FCT tiene mucha miga. Está firmada por nueve personas pertenecientes a la *European Society of Toxicologic Pathology* (ESTP). De entre ellas, destacar a Frédéric Schorch, presidente de la ESTP en 2012, y a Thomas Nocte y Mathias Rinke, responsables del *Registry of Industrial toxicology animal-data* (RITA). El presidente de la ESTP suele tener como tradición realizar un discurso en la *Classic Examples in Toxicologic Pathology*, el congreso anual de la ESTP. Como no podía ser de otra manera, Schorch realizó los suyos durante su mandato y en el de 2013 nos recuerda la función de estos encuentros y su importancia en el “asunto Séralini”. Deja bien clara que una de las funciones de la ESTP es el lobbying. También deja muy claros sus prejuicios:

"El objetivo y el beneficio de los Classic Examples in Toxicologic Pathology son únicos y están bien definidos: compartir conocimientos y desarrollar competencias sólidas en patología toxicológica. Mantener relaciones y contactos sólidos no solo fortalece a nuestra Sociedad, sino también a nuestras industrias en Europa. Hemos visto con qué rapidez la ESTP reaccionó en septiembre contra la publicación de Séralini, un profesor francés de bioquímica, conocido como activista anti-OMG. Quiero agradecer nuevamente a nuestros miembros que se ofrecieron como voluntarios para explicar por qué este trabajo se realizó incorrectamente y presentó graves deficiencias, especialmente en patología toxicológica. Nuestra reacción rápida y bien recibida solo fue posible porque nos conocemos, ya que nos reunimos regularmente".

Los voluntarios Noche y Rinke tenían muy buenas razones para ofrecerse a ello. El RITA es un proyecto en el cual colaboran, junto a la ESTP, empresas como BASF, Bayer o Syngenta²⁶⁷.

La siguiente carta al editor de FCT, además de *lobbying*, incluye una variable extra que podríamos denominar la "geopolítica del glifosato". Cuando las grandes empresas occidentales encuentran problemas a la expansión de su negocio dentro de las fronteras de occidente, tiene que recurrir a la guerra sucia mediática y el contraespionaje social. Cuando esto ocurre en países externos pero que, o bien son aliados o bien poseen estructuras estatales débiles, se utiliza la guerra sucia paramilitar. Sin embargo, cuando se intenta expandir un negocio hacia un país considerado por la dirección militar del Estado donde se desarrolla tu actividad económica como enemigo, la cosa se pone difícil. Hay que desarrollar otro tipo de estrategias más cercanas al espionaje y contraespionaje clásico, que a campañas publicitarias de prestigio/desprestigio.

Vamos a intentar desgranar alguno de los elementos de esta variable geopolítica a través de Alexander Y. Panchin. Primero hemos de saber que Panchin no es un experto en fisiología o biología molecular

267 También contribuyen de forma importante empresas farmacéuticas como Astra-Zeneca, Boehringer Ingelheim Pharma, Novartis o Pfizer entre otras. En Schorch (2013) se puede consultar tanto el discurso, como la información sobre el RITA.

de plantas. Tampoco es genetista. Eso sí, por su profesión, trabaja próximo a algunos de estos profesionales. Él es un biólogo computacional del Instituto A. A. Kharkevich para los problemas en la transmisión de la información, de la *Russian Academy of Sciences*. El año 2013 fue también el primer año en el cual comenzó un descenso en los aumentos de hectáreas sembradas con OMG a nivel mundial. Este proceso de descenso culminó en 2015 con el primer año en el cual se produjo un descenso en el número de hectáreas sembradas. Es hito fue recogido, por ejemplo, por los principales diarios económicos y políticos de la élite del hegemon estadounidense (cf. la crónica de Andrew Pollack para el *New York Times* de ilustrativo título: *Acreage for Genetically Modified Crops Declined in 2015*²⁶⁸). En este contexto de desaceleración mundial del negocio en términos de uso de la tierra, se produce un movimiento de las multinacionales hacia uno de los países más grandes del mundo: Rusia. Un país cuya legislación todavía no impedía el cultivo de OMG, pero en el cual existían restricciones a su "libre" expansión. Según recogen diferentes crónicas, en 2016 se produjo un intento de *lobbying* en el corazón político del oso ruso: diversos movimientos en el parlamento federal ruso (Duma) intentaron aprobar legislación permisiva con este tipo de cultivos. Sin embargo, en este caso bajo acción directa del gobierno encabezado por Putin, se produjo un contra-movimiento que acabó con la aprobación de una legislación contraria a estos intereses: a partir de 2016 se prohibió el cultivo de OMG en Rusia y se apostó por un modelo de agricultura basado en los principios de la agricultura orgánica²⁶⁹. Por supuesto, era todo un relato.

De lo que se trataba era de mantener el capital de la industria agrícola rusa dentro de las fronteras rusas, impidiendo la entrada de las poderosas multinacionales occidentales. Y se consiguió. No obstante, lo importante aquí es que Alexander Y. Panchin ejerció su papel de *lobbying* público. Ningún biólogo molecular ni fisiólogo vegetal de la Academia de Ciencias Rusa se posicionó a favor de los OMG, sino que

268 Publicada el 13 de abril de 2016.

269 Existen diversas crónicas y análisis sobre el asunto. Especialmente recomendable, por la contextualización global que realiza, es el de Sabini Fernández (2017).

fue Panchin junto a un oftalmólogo con doble filiación, en el mismo instituto que Panchin y en la escuela de medicina de la Universidad de Miami (EE.UU.), Alexander I. Tuzhikov, los que publicaron un artículo en 2017 donde realizan un metaanálisis estadístico para concluir que la bioactividad observada en los estudios de alimentación de animales con OMG no es realmente un “efecto” porque no se diferencia del azar. Es muy probable que estén en lo cierto. Lo que es un hecho es que es el único artículo que han publicado sobre esta temática, que su currículum académico es bastante discreto y que ambos tienen artículos bastante misceláneos publicados en conjunto²⁷⁰ y que poco tienen que ver con la agroindustria.

Pero una cosa que quede clara: ninguno de los dos tiene vínculos fuertes con la industria agrícola y no hay pruebas de su vinculación directa. La evidencia no deja de ser circunstancial (el momento elegido para actuar, sin ser expertos en la materia). Hay otra cosa que destaca con respecto a las otras cartas al editor de FCT: la diferencia de edad. Son jóvenes. El resto de investigadores fuertemente conectados a Bayer-Mosanto y/o a Syngenta son investigadores cercanos a su jubilación o ya eméritos en el momento de escribir sus cartas. Esto es importante porque, probablemente en el contexto Ruso la cooptación de investigadores funcione exactamente igual que en Europa, EE.UU. o Australia: se busca personal que pueda actuar como una correa de transmisión entre el poder económico y el lugar donde se toman legalmente las decisiones. En este contexto ruso, solamente alguien de “fuera” de la biología molecular de plantas podía hacer esta crítica. El

²⁷⁰ Por poner un ejemplo, en “Midichlorians--the biomeme hypothesis: is there a microbial component to religious rituals?” hipotetizan que “*Algunos microorganismos obtendrían una ventaja evolutiva al alentar a los huéspedes humanos a realizar ciertos rituales que favorecen la transmisión microbiana. Nuestra hipótesis*” continúan afirmando “*es que ciertos aspectos de la conducta religiosa observada en la sociedad humana podrían verse influenciados por el control del huésped microbiano y que la transmisión de algunos rituales religiosos podría considerarse como la transmisión simultánea de ideas (memes) y organismos parásitos*”. Son dignos herederos de la escuela rusa de la evolución o de Lynn Margulis. Pero de cómo evitar verse atrapados en un conflicto geopolítico de primer orden parecen saber más bien poco. O demasiado.

poder político y económico están alineados con el mantenimiento del capital ruso dentro de las fronteras rusas. Esto es lo que se denomina un control positivo²⁷¹.

La catorceava carta al director de FCT está firmada por Louis Ollivier. La crítica de Ollivier (2013) es completamente legítima: no le gustan los métodos estadísticos utilizados por Séralini *et al.* (2012) y propone que utilice otros. La argumentación del autor es que el test denominado Chi-cuadrado es un clásico del análisis en busca de diferencias entre dos grupos (uno grupo al cual se le ha aplicado un tratamiento y el otro al que no, por ejemplo). Con los datos disponibles, Ollivier realiza el test y obtiene resultados no significativos. El maíz NK603 no se diferenciaría en tasas de mortalidad de un maíz no transgénico. Sin embargo la metodología estadística escogida por el grupo de Séralini fue más completa y compleja: ANOVA, análisis de componentes principales o regresiones PLS. No hay porqué entrar en detalle en lo que significa cada test y cómo se hace²⁷². Necesitaríamos varias páginas solamente para una explicación somera de los mismos y este texto no tiene por objeto el análisis de la metodología estadística. Es una interesante discusión, sin embargo, que para hacer una crítica completa de cualquier trabajo de investigación que realice análisis estadísticos debe incluirse²⁷³. Sin

²⁷¹ Rusia, al haber legislado contra los OMG para proteger su agroindustria, ponía mucho más difícil a cualquiera que quisiera influir en ese sector económico en favor de los OMG la oposición abierta. No solamente por las tácticas autoritarias dentro de la Federación rusa, sino porque a agroindustria rusa ya había cooptado a la mayor parte de los investigadores punteros del sector en favor de la causa proteccionista como demuestra la carta que escribió la *Academia Rusa de las Ciencias* contra el artículo de Tuzhikov. Solamente alguien de fuera podía ser cooptado por el capital occidental para realizar lobbying a través de la repercusión mediática. Y así ocurrió.

²⁷² No es cierto “*que para la comparación de los ratios de mortalidad entre varios tratamientos*” sea “clásico” el uso del test Chi-cuadrado como afirma Louis Ollivier. Existen, al menos, otros dos test sencillos para realizar esta comparación (test-T y test McNemar). Su uso dependerá del tipo de datos que tengamos.

²⁷³ Hoy en día, cualquier trabajo de investigación incluye estadística avanzada en su realización. Cualquier metaanálisis, cualquier trabajo que incorpore herramientas de IA, *blockchain*, redes neuronales, etc. tiene un impresionante aparato matemático detrás que debería conocerse para ver realmente si el estudio está bien hecho.

embargo, vuelve a ser una discusión metodológica. No justifica la retractación del estudio. Sí su crítica. Los métodos estadísticos escogidos por el equipo de Séralini podemos discutirlos, pero están bien hechos.

Lo que no está bien es intentar engañar al lector. La afiliación de Louis Ollivier no aparece en la carta al editor de FCT. Sin embargo, desde principios de 1980 hasta el 2013 estuvo trabajando, directa o indirectamente, para el Instituto Nacional de Investigación agronómica, en la sección de genética cuantitativa y aplicada, del Estado francés. De hecho, estuvo al pie del cañón como director emérito del INRA hasta el día de su muerte (el 22 de julio de 2020) según afirma el obituario realizado por la *European Federation for Animal Science* (EAAP). ¿Por qué no incluyó la filiación? También fue director, desde 1993 hasta el 2002 de la propia EAAP desarrollando durante ese tiempo múltiples proyectos de investigación en recursos genéticos animales para la mejora de la producción de carne (OMG animales). También fue miembro de las academias francesas y suecas de agricultura y director de la revista *"Genetics, Selection, Evolution"* de 1991 a 1996. Un pequeño, pequeñito, conflicto de intereses en su carta sí que había.

Win Grunewald y Jo Bury enviaron, también, su análisis sobre al artículo del grupo de Séralini. Las críticas se centran en la metodología del trabajo, como la mayoría de cartas analizadas. Ambos son fundadores del Instituto Flamenco de biotecnología (VIB por sus siglas en neerlandés). Este proyecto lo iniciaron junto a Rudy Dekeyser. En una entrevista realizada por Jef Van Baelen para el diario flamenco *Knack*, Win Grunewald exhibía lo que Barbara Van Dyck y Saurabh Arora denominan *"alianzas tácticas entre los argumentos basados en la ciencia y el populismo autoritario"*. Sabemos que hay un descontento enorme contra las multinacionales como Monsanto, Dupont, Bayer o BASF, por el oligopolio de las semillas modificadas genéticamente. Los pequeños agricultores están cabreados. Pero, ¿es la solución deshacer ese oligopolio? En absoluto. Lo que hay que hacer es una buena campaña mediática primero para poder convencer a quien va a ser explotado:

"Las multinacionales tienen una responsabilidad en esto. Deberían haberlo controlado mejor. Cuando se dieron cuenta de que las cosas iban mal, deberían haberlo revertido. Es una pena, porque la imagen

ha quedado completamente socavada. En Canadá Se ha tratado con cuidado y no se ve una mayor aparición de malas hierbas resistentes".

Es como mínimo indignante que, en el apartado de "conflicto de intereses" de Grunewald y Bury (2013) se alegue que *"ninguno de los dos firmantes tienen intereses en el maíz NK603 o en el Roundup"* aunque *"el VIB es una autoridad mundial en investigación vegetal que utiliza plantas modificadas genéticamente como recurso de investigación"* y en algunos casos *"los nuevos conocimientos que el VIB reúne de esta manera pueden (...) contribuir al desarrollo de cultivos modificados genéticamente"*. El propio Grunewald trabaja también para *Brantsandpatents*²⁷⁴ y uno de los objetivos del VIB es la explotación comercial de las patentes en las que participa. También, en 2015, los dos firmantes de la carta escribieron *"The GMO Revolution"*²⁷⁵. Quien vea conflicto de intereses es un sucio ecologista.

La última carta que criticaba el artículo del grupo de Séralini estaba firmada por Dung Le Tien y Ham Le Huy, de Instituto de Genética de la Agricultura de Hanoi (Vietnam). Este instituto es el encargado de la investigación en nuevas variedades de arroz y maíz para la producción de alimentos y biofuel. Es además utilizado por el Ministerio competente para dirigir las políticas agroindustriales del país. Desde 2013-2014, y dada la bajada de los incrementos en la implantación de los OMG a nivel mundial, el capital agroindustrial se movió también hacia Asia. India, Bangladesh o Vietnam fueron su objetivo (y ya hemos visto que lo intentaron también en Rusia). Por ejemplo, tenemos un artículo firmado por un economista y por un diputado vietnamita alabando las

²⁷⁴ "Desde 2011, *brantsandpatents* es el despacho de referencia para las empresas que necesitan asesoramiento sólido y estratégico en materia de propiedad intelectual (PI). Con un enfoque contemporáneo y dinámico, *brantsandpatents* integra una estrategia de PI personalizada que tiene en cuenta las necesidades y el ADN de su empresa y su mercado. Le valoramos como cliente". Esta es la presentación que se encuentra cualquiera que acceda a la web de la empresa.

²⁷⁵ El hecho de escribir un libro en sí no es un argumento que indique un conflicto de intereses. Es la guinda de un pastel formada por el VIB y el trabajo en una empresa dedicada al asesoramiento legal en asuntos de propiedad intelectual específicamente relacionados con los organismos modificados genéticamente y, en general, todo lo que tenga que ver con la propiedad intelectual y el ADN.

pruebas realizadas, entre otros, con maíz NK603 de Monsanto en el país (Brookes y Dinh, 2021). Si, un artículo admitido en una revista revisada por pares *Genetic modified Crops and Food* escrito por personas algo ajenas al método científico²⁷⁶. La carta de Le Tien y Le Huy (2013) no aporta ninguna crítica nueva con respecto a las ya explicadas. Nos está mostrando un detalle más de la geopolítica del glifosato.

Las respuestas a las críticas: cómo una simple revisión rápida puede tumbar a nivel argumental una campaña mediática

La única carta que apoya la aceptación del artículo del grupo de Séralini está firmada por Jack A. Heinemann, del Centro integral para la investigación en Bioseguridad de la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda). Es una persona que ha dedicado, a partes iguales, su vida académica a la lucha política y al incremento del conocimiento colectivo. Lo que mejor puede definir a Heinemann es el posicionamiento que ha realizado en favor del derecho de manifestación, de expresión y de libertad académica y la autonomía universitaria con el motivo de la represión en los campus universitarios por el genocidio cometido contra el pueblo palestino (cf. Heinemann, 2024). La argumentación de Heinemann (2013) es muy sencilla. ¿Por qué se ha levantado tanto alboroto por un artículo que tiene los mismos rasgos metodológicos que otros artículos publicados en FCT?

“Encontré siete estudios entre 2004 y la actualidad [2013], todos publicados en FCT, en los que se alimentó a ratas Sprague-Dawley con

²⁷⁶ Hay un acalorado debate sobre si la economía, tal y como hegemonícamente es impartida en las universidades occidentales hoy en día, es o no una disciplina científica. El trabajo de Freeman *et al.* (2024) muestra la evolución histórica entre la valoración del trabajo científico realizado por un determinado grupo de investigación en función del prestigio de la institución donde éste se realiza. La química, la biología (medicina) o la física muestran cómo el impacto de un determinado estudio depende cada vez menos del prestigio de la institución donde se realiza. Sin embargo, en economía esta relación se invierte, sobre todo a partir de 1970, años en los que el neoliberalismo y la economía hegemónica comienza su auge. Blanco y en botella.

dietas suplementadas con material de plantas modificadas genéticamente. Todos estos artículos fueron publicados por las empresas que desarrollaron la planta transgénica utilizada en el estudio. Uno de ellos era de Monsanto y los otros de DuPont/Pioneer. Ninguno de los artículos se extendió más allá de los 90 días”.

Metodológicamente además, los estudios realizados por estas multinacionales y publicados en FCT eran muy similares a Séralini *et al.* (2012): misma cantidad de ratas, metodología estadística similar, etc. Nadie solicitó su retirada, ni escribió cartas al editor de la revista, ni alimentó a periodistas con *Fake News* sobre la autoría del texto, etc. Nada. Es demasiado evidente que en llamado asunto Séralini fue una campaña mediática. Si este caso se produjera en la actualidad incluiría vídeos pagados a *Streamers* con millones de visualizaciones, compra de bots ucranianos o indios o tertulianos en televisión que responden al dueño del cheque ingresado en su cuenta corriente.

Por su parte, el grupo de investigación de Séralini realizó una completa contestación a todas las críticas realizadas. En el resumen del informe afirman que:

“Nuestro trabajo (...) sigue siendo hasta la fecha el estudio más detallado que involucra el consumo a largo plazo un OMG agrícola. Esto es cierto especialmente para el maíz NK603 para el cual solo se realizó una prueba de 90 días para la liberación comercial utilizando la misma cepa de ratas @ue utilizamos]. También es la primera investigación detallada a largo plazo sobre mamíferos expuestos a un pesticida altamente diluido en su formulación total con adyuvantes. Esto puede explicar por qué el 75% de nuestras primeras críticas (que surgen todas en solo una semana), provienen de biólogos vegetales, algunos que están desarrollando patentes sobre OMG (...). Nuestro estudio tiene límites como cualquier otro (...). En este nivel, cualquier debate científico es tendencioso con las pruebas de toxicidad en mamíferos de NK603 y Roundup obtenidas por Monsanto Company permanecen confidenciales y, por lo tanto, no están disponibles en formato electrónico para que toda la comunidad científica realice un escrutinio independiente de los datos brutos”.

Como deja claro el propio Gilles-Éric Séralini en su libro *“Los papeles de Monsanto: el escándalo del caso Roundup”*, el artículo retractado no va en sí de los OMG, sino del uso del herbicida Roundup®. Es decir, cuando hablamos de OMG, en realidad estamos hablando de glifosato.

Consecuencias del caso y análisis

Otra de las pruebas que indican que estamos ante un claro ejemplo de campaña mediática y lobbying de la industria agrícola en el seno de uno de los procesos más importantes del método científico (la publicación de estudios revisados por pares) es que el estudio de Séralini *et al.* (2012) fue retractado de la revista FCT (en contra de los deseos de sus autores, que lo consideraban apto para su publicación) y, posteriormente (cuando el daño mediático y público ya estaba hecho) publicado en 2014 en la revista *Environmental Sciences Europe*, también revisada por pares. Séralini *et al.* (2014) no tiene ningún cambio con respecto al artículo retractado de FCT.

Fagan *et al.* (2015) describen lo ocurrido como una disputa entre grupos de interés *“que compiten por la retractación y republicación de artículos que informan resultados controvertidos”*. Este tipo de batallas *“eclipsan el proceso científico normal en el que la publicación revisada por pares estimula nuevas investigaciones, generando nueva evidencia empírica que impulsa la evolución de la comprensión científica”* y terminan por concluir que *“la tensión inherente entre el proceso científico y los intereses comerciales de los desarrolladores de productos requiere la implementación de salvaguardas que protejan el proceso científico y eviten la degeneración de la Ciencia hacia una ‘Re-Ciencia’ (caracterizada ésta por disputas de retractación y republicación)”*.

Es curioso que cuando el análisis se realiza desde fuera de la agroindustria, como se ha demostrado a lo largo de este libro (con el análisis de los efectos en los ecosistemas terrestres del herbicida glifosato), la conclusión sea siempre la misma. Afirman Fagan *et al.* (2015):

“Nuestro análisis de la evidencia publicada actualmente confirma que el NK603 y el Roundup son tóxicos para los riñones y el hígado en niveles inferiores a los umbrales regulatorios actuales. En consecuencia, el estado regulatorio del NK603, el glifosato y el Roundup requiere una

reevaluación. Además, la evidencia preliminar indica que el Roundup y el NK603, individualmente y en combinación, pueden aumentar la incidencia y la mortalidad de tumores. Se requieren estudios de carcinogenicidad de seguimiento a largo plazo, utilizando cepas de animales de prueba y cantidades de animales que aseguren conclusiones sólidas, para confirmar/refutar esta evidencia preliminar”.

Volvamos, para finalizar, a *The Monsanto Papers*. Tanto en el libro escrito por el propio Séralini (2022), como los documentos completos de los casos penales en EE.UU. publicados y clasificados por el bufete Wisner Baum²⁷⁷, podemos comprobar cómo toda esta serie de cartas escritas a FCT, y de su correlato divulgativo en medios de comunicación de masas, en medios de comunicación de nicho o, incluso, en blogs, fue ordenada y orquestada por Bayer-Monsanto. Hay al menos 54 comunicaciones internas de la empresa entre 2005 y 2016 que citan a Séralini y todas ellas dedicadas a contra-argumentar artículos publicados por su grupo de investigación. 34 de estas comunicaciones se producen entre 2012 y 2013.

Evaluación del Glifosato como un herbicida seguro

En este bloque final se va a incidir en el proceso de evaluación de la seguridad e idoneidad del glifosato en la Unión Europea y el proceso de evaluación que siguió la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer de las Naciones Unidas. Lo que se muestra refuerza la idea de la presencia de lobbies formales e informales en el proceso de construcción del conocimiento científico formal y la adopción de regulaciones en base a él.

La IARC, como ya hemos visto, emitió un informe en 2015 donde se clasificaba el glifosato²⁷⁸ como *“probablemente cancerígeno para los*

277 Accesibles en <https://www.wisnerbaum.com/toxic-tort-law/monsanto-roundup-lawsuit/monsanto-papers/> [consultado por última vez el 17 de septiembre de 2024]

278 Analizó en su decisión únicamente la molécula de glifosato y no las formulaciones comerciales del mismo, que como se ha descrito, incluyen surfactantes igual o más bioactivos que el propio herbicida (como el POEA).

seres humanos". También hemos visto que un trabajador de Monsanto, Tom Sorahan, ejerció de supervisor de parte durante la elaboración de este informe. Esta es solamente una parte del proceso de presión a la IARC. Sorahan no estaba en aquellas reuniones para influir en lo que se decidía: Monsanto no tenía la mayoría en aquellas reuniones y la industria agroquímica tampoco. Sin embargo, otros organismos sí que están cooptados por estas industrias. En el informe del *Corporate Europe Observatory*, realizado por Holland et al. (2012), vemos cómo la EFSA y la ECHA están claramente influenciadas por la industria que deben regular. No debe extrañar, por tanto, que en el contexto del informe de la IARC sobre el glifosato (y tan solo un año después), el *Comité de Evaluación de Riesgos* (RAC por sus siglas en inglés) de la ECHA en su informe "*Toxicological re-evaluation of glyphosate*", descartará las sólidas pruebas existentes en el informe de la IARC para clasificar el glifosato como presunto carcinógeno humano y lo considera como completamente seguro.

Un proceso similar ocurrió en la EFSA. Además de sus vínculos con la industria agroalimentaria, la EFSA no es una institución transparente. La transparencia es un principio jurídico que permite a cualquier institución, en especial a los organismos regulatorios, mantener su credibilidad, su independencia y la confiabilidad del sector económico que regula y de la ciudadanía en su conjunto. La EFSA tuvo que ser obligada judicialmente en 2016 a revelar los datos en bruto de tres estudios cruciales que realizó entre 1997 y 2009 para evaluar la seguridad del herbicida. Sin embargo, según el *Corporate Europe Observatory*²⁷⁹, esta información fue "liberada" solamente en parte: "*se habían eliminado grandes secciones de datos*".

Redundando en la diferente forma de proceder de la IARC y la EFSA vemos que, tanto la multiplicidad de actores, como la transparencia y

²⁷⁹ Tal y como está organizado el sistema de elaboración de políticas públicas en Europa y EE.UU. la mutación de la sociedad civil organizada en lobbies es casi una obligación si se quiere influir en la redacción de la normativa sin recurrir a estrategias, digamos, más proactivas y costosas en términos de pérdida de libertad. Así, el *Corporate Europe Observatory* (CEO) es un grupo de ciudadanos constituidos legalmente como *lobby*, con experiencia en *lobbying*, que buscan revelar información de interés para la ciudadanía y que es deliberadamente ocultada por los organismos decisores, como en este caso.

la independencia son fundamentales en estos procesos. En un artículo firmado por más de 100 personas investigadoras (Portier *et al.*, 2016), se describen claramente estas diferencias y se pone en valor la cantidad y calidad de los grupos de trabajo de la IARC, su independencia y la transparencia de la información manejada. Sin embargo, se critica que la EFSA, a través de un grupo de trabajo formado por personas pertenecientes a un solo país (un país extremadamente dependiente de la industria química y sede de Bayer), el Instituto Federal Alemán de Evaluación de Riesgos (BfR). También se critican los defectos metodológicos del BfR: el anexo 1 del informe del BfR contiene "*graves defectos en la evaluación científica [que] caracterizan incorrectamente el potencial de riesgo carcinógeno de la exposición al glifosato. Dado que el [informe] es la base de la conclusión de la EFSA, es fundamental que se corrijan estas deficiencias*".

Este oscurantismo y mecánica de decisión, más propias de estados oligárquicos que de democracias, contrasta fuertemente con la reacción de la sociedad civil. En 2016 se constituyó en La Haya el Tribunal Internacional Monsanto (IMT por sus siglas en inglés), organizado enteramente por las personas afectadas por la toxicidad de los preparados comerciales en base a glifosato comercializados por la multinacional, por las personas afectadas por las prácticas de guerra sucia seguidas por la empresa y por personas socialmente comprometidas²⁸⁰. El análisis de la evidencia disponible a nivel científico por parte de este tribunal fue en la línea de la IARC y de la abundante literatura citada en este texto. Además, "*se determinó que las prácticas de Monsanto violan las normas de derechos humanos*"²⁸¹.

²⁸⁰ En España ha habido una experiencia similar para investigar, desde la sociedad civil organizada, las miles de muertes acaecidas en las residencias durante la pandemia de Covid-19 en 2020. Muchas personas fallecieron sin ser tratadas y sin derivar a hospitales. Esta comisión de investigación promovida por la "marea de residencias" y por los familiares afectados por estas muertes contó como presidencia del tribunal al magistrado emérito del Tribunal Supremo, José Antonio Martín Pallín, o María Victoria Zunzunegui Pastor, doctora en epidemiología por la Universidad de California.

²⁸¹ Para un análisis en profundidad sobre la importancia del IMT y experiencias similares se puede consultar Busscher *et al.* (2020).

El contraste entre las dos formas de procesar la información que representan la IAR, o el IMT, y la representada por la EFSA o la Comisión Europea, es evidente. Recordemos que la Unión Europea, siguiendo además las líneas políticas de occidente, ha renovado la licencia de uso del glifosato en agricultura hasta 2030. Además, no ha entrado al debate sobre la prohibición, o no, de los surfactantes en los productos comerciales en base a glifosato. Y esto se explica por el proceso de toma de decisiones, muy alejado de la ciudadanía.

Repasemos ese proceso de toma de decisiones en la UE. La EFSA es el organismo competente para establecer el protocolo de evaluación. Para que la evaluación de seguridad, y posterior renovación (o no) de la licencia de cualquier producto fitosanitario en la UE, debe producirse una solicitud de evaluación de seguridad. Esta solicitud puede hacerse de forma individual o, como es más común, mediante un grupo promotor. En el caso del glifosato, el proceso se inició a finales de 2019 por el *Glyphosate Renewal Group*²⁸², un lobby empresarial legalmente establecido en Bruselas formado por Bayer, Syngenta o Crop alliance, entre otras grandes empresas del sector agroindustrial a nivel europeo. Cuando el proceso está legalmente iniciado, la Comisión Europea es la responsable de nombrar a un grupo de países que actuaran como “ponentes” de una propuesta de resolución que deberán adoptar en un tiempo determinado y que será votada por el conjunto de países de la UE. Los países tienen autonomía para nombrar a las personas ponentes, pero hay un evidente “toma y daca” entre CE y Estados miembros para componer este grupo²⁸³.

Durante la evaluación llevada a cabo durante 2022 fueron seleccionados Francia, Hungría, los Países Bajos y Suecia. Además de la información que puedan recabar los estados ponentes, a través de sus organismos respectivos de evaluación del riesgo, la EFSA y la ECHA emiten sus informes, que han de tenerse en cuenta durante el proceso de toma de decisiones. El resto de Estados no ponentes realizan (o no) consultas similares a sus

²⁸² En su página web [<https://www.glyphosate.eu/>] podemos consultar los socios fundadores en el apartado Imprint.

²⁸³ Como hemos visto, en el proceso anterior de evaluación del glifosato la EFSA, a través de la CE, decidió que Alemania sería el Estado ponente.

organismos regulatorios. También se abre un periodo en el que la sociedad civil organizada puede incorporar informes a todo lo ya elaborado.

El proceso que se sigue a continuación es bastante farragoso. En pocas palabras: es de todo menos transparente: I) los Estados ponentes abordan la información y envían su análisis a la ECHA; II) Se solicita información extra al grupo de solicitantes de la renovación de la licencia; III) los Estados ponentes, con esa nueva información, envían su propuesta de renovación (o no) a la EFSA; IV) La EFSA es la encargada de evaluar la información disponible hasta el momento (de todas las partes) y emitir su conclusión a la Comisión Europea. La CE también recibe la opinión de la ECHA (paso I); V) la CE elabora una propuesta de resolución que envía a todos los países miembros de la UE y se consulta a los solicitantes de la renovación de la licencia sobre la propia propuesta de resolución; VI) tras todo esto, y la consulta entre la CE y los Estados miembros, se procede a la votación. La aprobación de la resolución debe realizarse por mayoría. En el proceso, más a medio plazo, pueden intervenir el Tribunal Europeo de Justicia, los tribunales nacionales y los organismos regulatorios nacionales.

A finales de 2022, mediante este proceso, no se consiguió aprobar la propuesta de resolución encabezada por la CE y por los países ponentes citados anteriormente. La CE, de manera unilateral, decidió prolongar un año más la licencia de uso del glifosato y reiniciar el proceso de evaluación del herbicida. A finales de 2023 la propuesta realizada por los mismos países y, en esencia, idéntica a la de 2022, fue aprobada: 10 años más de licencia y re-evaluación en 2033²⁸⁴. Los conceptos políticos son, a veces, difíciles de explicar de forma abstracta. Sin embargo, no parece que exista una forma más cristalina de contemplar el concepto de plutocracia.

En el proceso apenas aparece la sociedad civil, como hemos visto, pero sí que aparecen organismos reguladores claramente cooptados por la industria y organismos reguladores nacionales también cooptados por el capital nacional de cada país. ¿Puede un método de evaluación como este generar información confiable para la ciudadanía?, ¿puede generar una regulación que ponga en el centro la salud de nuestros ecosistemas y la propia salud humana?

²⁸⁴ Reglamento de ejecución (UE) 2023/2660 de la Comisión de 28 de noviembre de 2023.

Epílogo

vivimos tiempos difíciles. Los capitales nacionales de las diferentes potencias mundiales se están reorganizando en torno al polo estadounidense y el polo Chino-Ruso y desde hace ya demasiado tiempo todo tiene perfume de tercera guerra mundial. En este contexto el glifosato, su la evaluación de seguridad, su toxicidad, sus formas comerciales o los casos de cabildeo en torno a las regulaciones que le afectan son poca cosa.

Sin embargo, todo el mundo comprende que los recursos energéticos y las materias primas son y van a ser fuentes de conflicto militar entre los capitalismoes nacionales. Los argumentos sobran: el control de los recursos energéticos, como ha demostrado Gonzalo Reyes (2020), es la base de la reproducción del capital (y es lo que nos lleva de cabeza hacia la reducción rápida de las posibilidades de extracción de los mismos). Por tanto, cuando los costes de extracción aumentan, las tensiones geopolíticas por el acceso a los mismos también lo hacen. Justamente las tensiones se centran en Rusia, Irán (dos de los mayores productores y con mayores reservas de hidrocarburos) y China (con una cada vez más estrecha relación con estos dos países y las mayores reservas mundiales de tierras raras, cada vez más importantes en una economía que busca descarbonizarse).

El geógrafo Halford John Mackinder hipotetizó a principios del siglo XX lo que se ha conocido posteriormente bajo el nombre *Teoría del Heartland*²⁸⁵. Tras estudiar cómo habían operado las grandes potencias en el pasado, conjeturó que aquel bloque imperial que realmente se

²⁸⁵ Esta teoría fue enunciada en su obra *“El eje geográfico de la historia”* (1904). El colorario de su tesis se puede resumir en una famosa cita de este libro: “Quien controle Europa del Este dominará el Eje del Mundo, quien controle el Eje del Mundo dominará la Isla del Mundo, quien domine la Isla del Mundo dominará el mundo”. En otras palabras, quien controle Europa, controlará a la potencia terrestre, quien controle la potencia terrestre podrá operar a la vez como potencia marítima y potencia terrestre. Quien pueda hacer eso, controlará el Mundo.

quisiera hacer con el control del mundo, debería hacerse con el control del *heartland* o de la masa de tierra más grande del planeta, en este caso, Eurasia. Esto había venido pasando, según su análisis, desde que la potencia marítima de las polis griegas se enfrentó a la potencia terrestre persa; la potencia marítima romana se enfrentó a los pueblos del norte de Europa, y a las potencias asiáticas; la potencia marítima castellana, holandesa, francesa y, posteriormente, inglesa, tomaron un pedazo de tierra enorme como América. Y Mackinder decía que, si Estados Unidos (el mundo anglosajón en general) quería la hegemonía mundial de verdad, una potencia marítima como EE.UU. (recordemos que está rodeada de océanos y realmente aislada del resto), en alianza con otras potencias similares (Europa, Reino Unido o Australia) debían hacerse con el control del *heartland* Euroasiático. Podemos que, básicamente, esta es la dinámica geopolítica mundial.

Pero ello esconde el control de los recursos. El océano es un lugar bastante pobre: la corteza oceánica es básicamente basalto. Solamente en aquellos lugares donde la corteza continental está profunda en el océano podemos hallar petróleo *offshore*. En algunos lugares con la presión adecuada pueden depositarse clatratos de metano e hidratos de compuestos esenciales para la actual industria. Pero en general las minas, los pozos de petróleo, las tierras bituminosas, etc. están en tierra. También la posibilidad de cultivar. El capital necesita del *heartland* para reproducirse y quien lo controle, no solamente controlará el mundo, sino que se hará con el control de las ganancias. Y esto es lo único que parece importar a nuestras élites.

Comprender esto es esencial. La tesis del libro es que el glifosato y los OMG forman parte del conjunto de herramientas de las que se ha dotado el capital occidental (los capitales ruso o chino tienen otras) para mantener su hegemonía competitiva, para concentrar el capital en cada vez menos manos y, por tanto, incrementar las ganancias de esos pocos tenedores, aunque eso suponga que en conjunto el sistema no produzca más o que, incluso, produzca menos. Por eso, cada vez que una institución financiera controlada por la ideología financiera de Occidente interviene en un país (por ejemplo a través de un crédito), obliga a la implantación de medidas de “liberación del mercado” que

incluyen, casi siempre, una liberación del sector agrícola. La acumulación primitiva nunca es dejada de lado por los capitalistas.

Casi cualquier país latinoamericano puede servirnos de ejemplo, pero quizá un ejemplo paradigmático, con golpe de estado de por medio, sea el de Paraguay. El dictador Andrés Rodrigo, análogo a los dictadores como Videla (Argentina), Pinochet (Chile), mantuvo la represión en Paraguay desde 1989 hasta 1993, y posteriormente, un sistema iliberal tomó el relevo con tres gobiernos consecutivos del partido colorado (ANR) hasta 2008. En ese periodo de tiempo se aplicaron duras políticas neoliberales y se permitió a la agroindustria que se hiciera con el país. El porcentaje de tierra cultivada total pasó del 43,3% al 51,3%. El uso de fertilizantes por hectárea pasó de 171,1 a 203,9 toneladas. La pobreza rural se situó por encima del 50%. El peso de las rentas más pobres sobre la riqueza del país pasó, del 5,77% al 1,25% y el índice de GINI se disparó por encima de 50²⁸⁶. El Capital estadounidense decidió tomar por la fuerza, expropiar, la potencial acumulación primitiva de Paraguay. Y lo hizo a través de los OMG y del glifosato, utilizando como “ejército privado” las fuerzas policiales y militares criollas que estaban a su servicio. La represión fue brutal.

Otro caso lo podemos ver mientras se escriben estas líneas en la actual guerra de invasión de Ucrania por parte de Rusia. Ucrania posee las llamadas “tierras negras” que, según algunas estimaciones, son capaces de producir alimentos para unos 600 millones de personas. Desde que se produjo el *coup d'Etat* durante el Maidan en 2014, la compra de estas ricas tierras por parte de fondos de inversión anglosajones, chinos y saudíes se ha incrementado espectacularmente, acelerándose tras el inicio de la invasión rusa en 2022. Según un informe del *The Oakland Institute* escrito por Frédéric Mousseau y Eve Devillers en 2023, y titulado “*Guerre et spoliation: la prise de controle des terres agricoles ukrainiennes*”, la cantidad de tierra controlada por fondos de inversión participados por capital estadounidense suma aproximadamente el 5% de los más de 40 millones de hectáreas cultivables del país. Otro tanto estaría controlado por el capital Chino y un porcentaje mucho menor por

286 Todos estos datos económicos sobre Paraguay son accesibles en diferentes bases de datos, por ejemplo la fácilmente accesible del Banco Mundial.

capital saudí. Incluso el hijo del cuarentaiesavo presidente de EE.UU., Joe Biden, se unió a esta fiesta del capital depredador.

El control sobre la producción agrícola es esencial para el capitalismo. Lo es casi tanto como el control de las materias primas y los recursos energéticos. Hemos visto a lo largo del texto los intentos de influir en la política rusa para poder introducir las patentes anglosajonas en el mercado del oso y la influencia que ya tienen sobre Vietnam. Podemos esperar que, de forma paralela a este incremento de la belicosidad mundial debido al choque entre capitalismo, en la retaguardia se desarrollen nuevas formas de intentar asaltar el mercado de los productos agrícolas.

No se puede interpretar de otra manera la decisión de la CE de alargar hasta 2033 la licencia de uso del glifosato en la Unión Europea: "quien controle Europa del este dominará el eje del mundo". En esta misma línea no sería nada descartable la aprobación del CRISPR como una nueva forma de producir alimentos editados genéticamente en Europa (como forma de trampear la actual legislación) y no es previsible que esta tecnología se vuelva hegemónica en países donde existe un fuerte capital dominante de OMG tradicionales. No se evitará su producción, pero mientras no pueda esa tecnología producirse por el propio capital agroindustrial y obtener mayores beneficios por ello, la tecnología de los OMG y glifosato no será substituida. El plan C para todo ello es la (7dSh). Es muy posible que veamos, con mayor intensidad, políticas proteccionistas sobre importación de alimentos y, sobre todo, tecnología relacionada con la producción alimentaria y agrícola en occidente. Por el contrario, veremos que los capitales que se están organizando alrededor del eje Chino-ruso liberalizaran, entre ellos, sus economías agrarias a la vez que levanta barreras con occidente si la hostilidad sigue. Pero vemos, en paralelo, un interés enorme de China por la adquisición de medios de producción en Europa. La baza jugada por el capital occidental en Rusia en 2016 con los OMG es posible que la veamos repetida en Europa por parte de China.

La geopolítica del glifosato y de la tecnología agraria será, también, en los próximos años un lugar de análisis importante para conocer hacia donde se dirige nuestro mundo. Desafortunadamente no parece que se dirija hacia la paz y la estabilidad. Estaremos a la atención.

Referencias

- Aarestrup, F. M. (2005). Veterinary Drug Usage and Antimicrobial Resistance in Bacteria of Animal Origin. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 96(4), 271-281. <https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2005.pto960401.x>
- Achiorno, C. L., Villalobos, C. D., & Ferrari, L. (2008). Toxicity of the herbicide glyphosate to *Chordodes nobilii* (Gordiida, Nematomorpha). *Chemosphere*, 71(10), 1816-1822. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.02.001>
- Acquavella, J., Garabrant, D., Marsh, G., Sorahan, T., & Weed, D. L. (2016a). Glyphosate epidemiology expert panel review: A weight of evidence systematic review of the relationship between glyphosate exposure and non-Hodgkin's lymphoma or multiple myeloma. *Critical Reviews in Toxicology*, 46(sup1), 28-43. <https://doi.org/10.1080/10408444.2016.1214681>
- Acquavella, J., Garabrant, D., Marsh, G., Sorahan, T., & Weed, D. L. (2016b). Glyphosate epidemiology expert panel review: A weight of evidence systematic review of the relationship between glyphosate exposure and non-Hodgkin's lymphoma or multiple myeloma. *Critical Reviews in Toxicology*, 46(sup1), 28-43. <https://doi.org/10.1080/10408444.2016.1214681>
- Ait-Bali, Y., Ba-M'hamed, S., Gambarotta, G., Sassoè-Pognetto, M., Giustetto, M., & Bennis, M. (2020). Pre- and postnatal exposure to glyphosate-based herbicide causes behavioral and cognitive impairments in adult mice: Evidence of cortical ad hippocampal dysfunction. *Archives of Toxicology*, 94(5), 1703-1723. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02677-7>
- Ali, N., Katsouli, J., Marczylo, E. L., Gant, T. W., Wright, S., & Bearndino De La Searn, J. (2024). The potential impacts of micro-and-nano plastics on various organ systems in humans. *eBioMedicine*, 99, 104901. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104901>
- An, J., Jiang, Y., Cao, H., Yi, C., Li, S., Qu, M., & Liu, G. (2023). Photodegradation of glyphosate in water and stimulation of by-products on algae growth. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115211>
- Aparicio, V. C., De Gerónimo, E., Marino, D., Primost, J., Carriquiriborde, P., & Costa, J. L. (2013). Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins. *Chemosphere*, 93(9), 1866-1873. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.041>
- Aris, A., & Leblanc, S. (2011). Maternal and fetal exposure to pesticides associated to genetically modified foods in Eastern Townships of Quebec, Canada. *Reproductive Toxicology*, 31(4), 528-533. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2011.02.004>
- Aristilde, L., Reed, M. L., Wilkes, R. A., Youngster, T., Kukurugya, M. A., Katz, V., & Sasaki, C. R. S. (2017). Glyphosate-Induced Specific and Widespread Perturbations in the Metabolome of Soil Pseudomonas Species. *Frontiers in Environmental Science*, 5, 34. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00034>

- Ascherio, A., Chen, H., Weisskopf, M. G., O'Reilly, E., McCullough, M. L., Calle, E. E., Schwarzschild, M. A., & Thun, M. J. (2006). Pesticide exposure and risk for Parkinson's disease. *Annals of Neurology*, 60(2), 197-203. <https://doi.org/10.1002/ana.20904>
- Ashley-Martin, J., Huang, R., MacPherson, S., Brion, O., Owen, J., Gaudreau, E., Bienvenu, J.-F., Fisher, M., Borghese, M. M., Bouchard, M. F., Lanphear, B., Foster, W. G., & Arbuckle, T. E. (2023). Urinary concentrations and determinants of glyphosate and glufosinate in pregnant Canadian participants in the MIREC study. *Environmental Research*, 217, 114842. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114842>
- Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M. J., Avilés-Vázquez, K., Samulon, A., & Perfecto, I. (2007). Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(2), 86-108. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001640>
- Baelen, J. V. (2014, noviembre 4). «De mens stuurt natuurlijke selectie al 10.000 jaar». Knack. <https://www.knack.be/magazine/de-mens-stuurt-natuurlijke-selectie-al-10-000-jaar/>
- Bailey, D. C., Todt, C. E., Burchfield, S. L., Pressley, A. S., Denney, R. D., Snapp, I. B., Negga, R., Traynor, W. L., & Fitsanakis, V. A. (2018). Chronic exposure to a glyphosate-containing pesticide leads to mitochondrial dysfunction and increased reactive oxygen species production in *Caenorhabditis elegans*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 57, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.11.005>
- Baker, L. F., Mudge, J. F., Thompson, D. G., Houlahan, J. E., & Kidd, K. A. (2016). The combined influence of two agricultural contaminants on natural communities of phytoplankton and zooplankton. *Ecotoxicology*, 25(5), 1021-1032. <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1659-1>
- Baldi, I., Cantagrel, A., Lebailly, P., Tison, F., Dubroca, B., Chrysostome, V., Dartigues, J.-F., & Brochard, P. (2003). Association between Parkinson's Disease and Exposure to Pesticides in Southwestern France. *Neuroepidemiology*, 22(5), 305-310. <https://doi.org/10.1159/000071194>
- Ball, L., Still, R., Riggs, A., Skilbeck, A., Shardlow, M., Whitehouse, A., Tinsley-Mars hall, & Paul. (2022). *The bugs matter citizen science survey: Counting insect «splats» on vehicle number plates reveals a 58.5% reduction in the abundance of actively flying insects in the UK between 2004 and 2021*. <https://cdn.buglife.org.uk/2022/05/Bugs-Matter-2021-National-Report.pdf>
- Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505-511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Battaglin, W. A., Meyer, M. T., Kuivila, K. M., & Dietze, J. E. (2014). Glyphosate and Its Degradation Product AMPA Occur Frequently and Widely in U.S. Soils, Surface Water, Groundwater, and Precipitation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(2), 275-290. <https://doi.org/10.1111/jawr.12159>
- Battisti, L., Potrich, M., Sampaio, A. R., De Castilhos Ghisi, N., Costa-Maia, F. M., Abati, R., Dos Reis Martinez, C. B., & Sofia, S. H. (2021). Is glyphosate toxic to bees?

- A meta-analytical review. *Science of The Total Environment*, 767, 145397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145397>
- Benamú, M. A., Schneider, M. I., & Sanchez, N. E. (2010). Effects of the herbicide glyphosate on biological attributes of *Alpaida veniliae* (Araneae, Araneidae), in laboratory. *Chemosphere*, 78(7), 871-876.
- Benbrook, C. M. (2016). Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>
- Bender, S. F., Wagg, C., & Van Der Heijden, M. G. A. (2016). An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440-452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Benedetti, A. L., Vituri, C. D. L., Trentin, A. G., Domingues, M. A. C., & Alvarez-Silva, M. (2004). The effects of sub-chronic exposure of Wistar rats to the herbicide Glyphosate-Biocarb®. *Toxicology Letters*, 153(2), 227-232. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2004.04.008>
- Berry, C. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 445-446. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.053>
- Bloem, B. R., & Boonstra, T. A. (2023). The inadequacy of current pesticide regulations for protecting brain health: The case of glyphosate and Parkinson's disease. *The Lancet Planetary Health*, 7(12), e948-e949. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00255-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00255-3)
- BMAS. (2023). *Wissenschaftliche Empfehlung für die Berufskrankheit „Parkinson-Syndrom durch Pestizide“*. https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Soziales/Unfallversicherung/empfehlung-parkinson-durch-pestizide.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Bolognesi, C., Carrasquilla, G., Volpi, S., Solomon, K. R., & Marshall, E. J. P. (2009). Biomonitoring of genotoxic risk in agricultural workers from five Colombian regions: Association to occupational exposure to glyphosate. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 72(15-16), 986-997.
- Bonaz, B. (2010). Communication entre cerveau et intestin. *La Revue de Médecine Interne*, 31(8), 581-585. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2009.09.035>
- Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Naqvi, S. W. A., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., ... Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240. <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>
- Bridi, D., Altenhofen, S., Gonzalez, J. B., Reolon, G. K., & Bonan, C. D. (2017). Glyphosate and Roundup® alter morphology and behavior in zebrafish. *Toxicology*, 392, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.10.007>
- Brilisauer, K., Rapp, J., Rath, P., Schöllhorn, A., Bleul, L., Weiß, E., Stahl, M., Grond, S., & Forchhammer, K. (2019). Cyanobacterial antimetabolite 7-deoxy-sedoheptulose

- blocks the shikimate pathway to inhibit the growth of prototrophic organisms. *Nature Communications*, 10(1), 545. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08476-8>
- Brookes, G., & Dinh, T. X. (2021). The impact of using genetically modified (GM) corn/maize in Vietnam: Results of the first farm-level survey. *GM Crops & Food*, 12(1), 71-83. <https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1816800>
 - Bus, J. S. (2015). Analysis of Moms Across America report suggesting bioaccumulation of glyphosate in U.S. mother's breast milk: Implausibility based on inconsistency with available body of glyphosate animal toxicokinetic, human biomonitoring, and physico-chemical data. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(3), 758-764. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.10.022>
 - Busscher, N., Colombo, E. L., Van Der Ploeg, L., Gabella, J. I., & Leguizamón, A. (2020). Civil society challenges the global food system: The Intearntional Monsanto Tribunal. *Globalizations*, 17(1), 16-30. <https://doi.org/10.1080/14747731.2019.1592067>
 - Caballero, M., Amiri, S., Denney, J. T., Monsivais, P., Hystad, P., & Amram, O. (2018). Estimated Residential Exposure to Agricultural Chemicals and Premature Mortality by Parkinson's Disease in Washington State. *Intearntional Jouarnl of Environmental Research and Public Health*, 15(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122885>
 - Camiccia, M., Candiotto, L. Z. P., Gaboardi, S. C., Panis, C., & Kottwitz, L. B. M. (2022). Determination of glyphosate in breast milk of lactating women in a rural area from Paraná state, Brazil. *Brazilian Jouarnl of Medical and Biological Research*, 55, e12194. <https://doi.org/10.1590/1414-431x2022e12194>
 - Can Ulu, T., Sadic, B., & Susurluk, I. A. (2016). Effects of different pesticides on virulence and mortality of some entomopathogenic nematodes. *Invertebrate Survival Jouarnl*, 111-115 Pages. <https://doi.org/10.25431/1824-307X/ISJ.V13I1.111-115>
 - Carpenter, J. K., Monks, J. M., & Nelson, N. (2016). The effect of two glyphosate formulations on a small, diuarnl lizard (*Oligosoma polychroma*). *Ecotoxicology*, 25(3), 548-554. <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1613-2>
 - CEO. (2016, diciembre 14). *Scientific scrutiny on EFSA's work, at last?* <https://corporateeurope.org/en/efsa/2016/12/scientific-scrutiny-efsa-work-last>
 - Chang, E. T., Odo, N. U., & Acquavella, J. F. (2023). Systematic literature review of the epidemiology of glyphosate and neurological outcomes. *Intearntional Archives of Occupational and Environmental Health*, 96(1), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01878-0>
 - Clair, E., Linn, L., Traver, C., Amiel, C., Séralini, G.-E., & Panoff, J.-M. (2012). Effects of Roundup® and Glyphosate on Three Food Microorganisms: *Geotrichum candidum*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. *Current Microbiology*, 64(5), 486-491. <https://doi.org/10.1007/s00284-012-0098-3>
 - Clair, É., Mesnage, R., Traver, C., & Séralini, G.-É. (2012). A glyphosate-based herbicide induces necrosis and apoptosis in mature rat testicular cells in vitro, and testosterone decrease at lower levels. *Toxicology in Vitro*, 26(2), 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2011.12.009>

- Clària, J., & Títos, E. (2004). La célula de Kupffer. *Gastroenterología y Hepatología*, 27(4), 264-273.
- Cognetti, G., Sarà, M., & Magazzù, G. (2001). *Biología Marina* (1ª). Ariel.
- Comisión Nacional de Bioseguridad. (2019). *Informe de evaluación del riesgo de la liberación en campo de plantas de patata modificado genéticamente*. Notificación B/ES/19/02. Dirección general de calidad y evaluación ambiental y medio natural. Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/biotecnologia/erma_b_es_19_02_tcm30-498840.pdf
- Corona, F., & Martínez, J. (2013). Phenotypic Resistance to Antibiotics. *Antibiotics*, 2(2), 237-255. <https://doi.org/10.3390/antibiotics2020237>
- Correia, F. V., & Moreira, J. C. (2010). Effects of Glyphosate and 2,4-D on Earthworms (*Eisenia foetida*) in Laboratory Tests. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85(3), 264-268. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0089-7>
- Costas-Ferreira, C., Durán, R., & Faro, L. R. F. (2022). Toxic Effects of Glyphosate on the Nervous System: A Systematic Review. *Intearntional Jouarnl of Molecular Sciences*, 23(9), 4605. <https://doi.org/10.3390/ijms23094605>
- Cousins, I. T., Johansson, J. H., Salter, M. E., Sha, B., & Scheringer, M. (2022). Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11172-11179. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>
- Cruz De Carvalho, R., Feijão, E., Matos, A. R., Cabrita, M. T., Novais, S. C., Lemos, M. F. L., Caçador, I., Marques, J. C., Reis-Santos, P., Fonseca, V. F., & Duarte, B. (2020). Glyphosate-Based Herbicide Toxicophenomics in Marine Diatoms: Impacts on Primary Production and Physiological Fitness. *Applied Sciences*, 10(21), 7391. <https://doi.org/10.3390/app10217391>
- Cuhra, M. (2015). Review of GMO safety assessment studies: Glyphosate residues in Roundup Ready crops is an ignored issue. *Environmental Sciences Europe*, 27(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0052-7>
- Dallegre, E., Mantese, F. D., Coelho, R. S., Pereira, J. D., Dalsenter, P. R., & Langeloh, A. (2003). The teratogenic potential of the herbicide glyphosate-Roundup® in Wistar rats. *Toxicology Letters*, 142(1-2), 45-52. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00483-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00483-6)
- De Souza, J. S., Kizys, M. M. L., Da Conceição, R. R., Glebocki, G., Romano, R. M., Ortega-Carvalho, T. M., Giannocco, G., Da Silva, I. D. C. G., Dias Da Silva, M. R., Romano, M. A., & Chiamolera, M. I. (2017). Perinatal exposure to glyphosate-based herbicide alters the thyrotrophic axis and causes thyroid hormone homeostasis imbalance in male rats. *Toxicology*, 377, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2016.11.005>
- De Souza, L., & Macedo Oda, L. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 440. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.057>
- Del Mar Martínez-Prada, M., Curtin, S. J., & Gutiérrez-González, J. J. (2021). Potato improvement through genetic engineering. *GM Crops & Food*, 12(1), 479-496. <https://doi.org/10.1080/21645698.2021.1993688>

- Dennis, P. G., Kukulies, T., Forstner, C., Orton, T. G., & Pattison, A. B. (2018). The effects of glyphosate, glufosinate, paraquat and paraquat-diquat on soil microbial activity and bacterial, archaeal and nematode diversity. *Scientific Reports*, 8(1), 2119. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20589-6>
- Diamond, J. M. (with Chueca, F.). (2010). *Armas, gérmenes y acero: Breve historia de la humanidad en los últimos trece mil años* (1ª ed., 1ª reimpr). DeBolsillo.
- Domingo, J. L. (2007). Toxicity Studies of Genetically Modified Plants: A Review of the Published Literature. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(8), 721-733. <https://doi.org/10.1080/10408390601177670>
- Domínguez, J., Aira, M., & Gómez-Brandon. (2009). El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas*, 18(2), 20-31.
- Dornelles, M. F., & Oliveira, G. T. (2016). Toxicity of atrazine, glyphosate, and quinclorac in bullfrog tadpoles exposed to concentrations below legal limits. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 1610-1620. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5388-4>
- Doublet, J., Mamy, L., & Barriuso, E. (2009). Delayed degradation in soil of foliar herbicides glyphosate and sulcotrione previously absorbed by plants: Consequences on herbicide fate and risk assessment. *Chemosphere*, 77(4), 582-589. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.06.044>
- Druille, M., Cabello, M. N., Omacini, M., & Golluscio, R. A. (2013). Glyphosate reduces spore viability and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*, 64, 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.007>
- Duforestel, M., Nadaradjane, A., Bougras-Cartron, G., Briand, J., Olivier, C., Frenel, J.-S., Vallette, F. M., Lelièvre, S. A., & Cartron, P.-F. (2019). Glyphosate Primes Mammary Cells for Tumorigenesis by Reprogramming the Epigenome in a TET3-Dependent Manner. *Frontiers in Genetics*, 10, 885. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00885>
- Duke, S. O., & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319-325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- Duke, S. O., Lydon, J., Koskinen, W. C., Moorman, T. B., Chaney, R. L., & Hammerschmidt, R. (2012). Glyphosate Effects on Plant Mineral Nutrition, Crop Rhizosphere Microbiota, and Plant Disease in Glyphosate-Resistant Crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(42), 10375-10397. <https://doi.org/10.1021/jf302436u>
- EAAP. (2020, julio). *In memory of Louis Ollivier, French geneticist and EAAP Leroy Award recipient*. <https://www.eaap.org/wp-content/uploads/2020/07/obituary-ollivier-2.pdf>
- Eastmond, D. A., & Tucker, J. D. (1989). Identification of aneuploidy-inducing agents using cytokinesis-blocked human lymphocytes and an antikinetochore antibody. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 13(1), 34-43. <https://doi.org/10.1002/em.2850130104>
- ECHA. (s. f.). *Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)—ECHA*. Recuperado 25 de septiembre de 2024, de <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>

- ECHA. (2016). *Toxicological re-evaluation of glyphosate* (Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (JMPPR), pp. 1-20). https://echa.europa.eu/documents/10162/22863068/glyphosate_jmpr_en.pdf/7dbc05a9-d81b-054d-e750-0f762b579fe7
- Echeverría Ezponda, Javier. (2003). *La revolución tecnocientífica*. Fondo De Cultura Económica USA.
- Ellison, P. T. (with Rebolledo, F.). (2006). *En tierra fértil: Historia natural de la reproducción humana* (1 ed). Fondo de Cultura Económica.
- Eng, M. (2016, marzo 15). *Why Didn't An Illinois Professor Have To Disclose GMO Funding?* WBEZ. <https://www.wbez.org/food/2016/03/15/why-didnt-an-illinois-professor-have-to-disclose-gmo-funding>
- Enserink, M. (1999). The Lancet Scolded Over Pusztai Paper. *Science*, 286(5440), 656-656. <https://doi.org/10.1126/science.286.5440.656a>
- Eriguchi, M., Iida, K., Ikeda, S., Osoegawa, M., Nishioka, K., Hattori, N., Nagayama, H., & Hara, H. (2019). Parkinsonism Relating to Intoxication with Glyphosate. *Intearn Medicine*, 58(13), 1935-1938. <https://doi.org/10.2169/intearnmedicine.2028-18>
- Eriksson, M., Hardell, L., Carlberg, M., & Åkerman, M. (2008). Pesticide exposure as risk factor for non-Hodgkin lymphoma including histopathological subgroup analysis. *International Journal of Cancer*, 123(7), 1657-1663. <https://doi.org/10.1002/ijc.23589>
- Escrivà, A. (2023). *Contra la sostenibilidad. Por qué el desarrollo sostenible no salvará el mundo* (1ª). Arpa Editores.
- European Comision. (2013, diciembre 18). *Renewal Assessment Report. Glyphosate. Volume 3, Annex B.6.1, Toxicology and metabolism*. 3, 1-927.
- European Commission. Joint Research Centre. (2022). *CO2 emissions of all world countries: JRC/IEA/PBL 2022 report*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/07904>
- Evalen, P. S., Barnhardt, E. N., Ryu, J., & Stahlschmidt, Z. R. (2024). Toxicity of glyphosate to animals: A meta-analytical approach. *Environmental Pollution*, 347, 123669. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123669>
- Evans, S. C., Shaw, E. M., & Rypstra, A. L. (2010). Exposure to a glyphosate-based herbicide affects agrobiont predatory arthropod behaviour and long-term survival. *Ecotoxicology*, 19, 1249-1257.
- Ewen, S. W., & Pusztai, A. (1999). Effect of diets containing genetically modified potatoes expressing *Galanthus nivalis* lectin on rat small intestine. *The Lancet*, 354(9187), 1353-1354. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)05860-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(98)05860-7)
- Fagan, J., Traavik, T., & Bøhn, T. (2015). The Séralini affair: Degeneration of Science to Re-Science? *Environmental Sciences Europe*, 27(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0049-2>
- Fairbrother, A., Purdy, J., Anderson, T., & Fell, R. (2014). Risks of neonicotinoid insecticides to honeybees. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(4), 719-731. <https://doi.org/10.1002/etc.2527>

- Faria, M., Bedrossiantz, J., Ramírez, J. R. R., Mayol, M., García, G. H., Bellot, M., Prats, E., García-Reyero, N., Gómez-Canela, C., Gómez-Oliván, L. M., & Raldúa, D. (2021). Glyphosate targets fish monoaminergic systems leading to oxidative stress and anxiety. *Environment International*, 146, 106253. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106253>
- Farina, W. M., Balbuena, M. S., Herbert, L. T., Mengoni Goñalons, C., & Vázquez, D. E. (2019). Effects of the Herbicide Glyphosate on Honey Bee Sensory and Cognitive Abilities: Individual Impairments with Implications for the Hive. *Insects*, 10(10), 354. <https://doi.org/10.3390/insects10100354>
- Figueroa, C. (2019). Epidemiología de la enfermedad inflamatoria intestinal. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 30(4), 257-261. <https://doi.org/10.1016/j.rm-clc.2019.06.003>
- Francis, R. C. (2019). *En manos humanas: El papel de la domesticación en la evolución de las especies* (J. Rizzo, Trad.; Primera edición: septiembre de 2019). RBA.
- Freeman, R. B., Xie, D., Zhang, H., & Zhou, H. (2024). *High and Rising Institutional Concentration of Award-Winning Economists*.
- Fugère, V., M.-P. H., N.B., C., C.C.Y., X., R.D.H., B., B.E., B., G., B., G.F., F., B.J., S., V., Y., & A., G. (2018). Community rescue in experimental phytoplankton communities facing severe herbicide pollution. <https://doi.org/10.1101/467324>
- Gasnier, C., Dumont, C., Benachour, N., Clair, E., Chagnon, M.-C., & Séralini, G.-E. (2009). Glyphosate-based herbicides are toxic and endocrine disruptors in human cell lines. *Toxicology*, 262(3), 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.06.006>
- Gaupp-Berghausen, M., Hofer, M., Rewald, B., & Zaller, J. G. (2015). Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations. *Scientific Reports*, 5(1), 12886. <https://doi.org/10.1038/srep12886>
- Gee, H. (2002). Food & the future. *Nature*, 418(6898), 667-667. <https://doi.org/10.1038/418667a>
- George, J., Prasad, S., Mahmood, Z., & Shukla, Y. (2010). Studies on glyphosate-induced carcinogenicity in mouse skin: A proteomic approach. *Journal of Proteomics*, 73(5), 951-964. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2009.12.008>
- Geueke, B., Parkinson, L. V., Groh, K. J., Kassotis, C. D., Maffini, M. V., Martin, O. V., Zimmermann, L., Scherlinger, M., & Muncke, J. (2024). Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>
- Gillam, C. (2017). *Whitewash: The story of a weed killer, cancer, and the corruption of science*. Island Press.
- Gillam, C. (2021). *The Monsanto papers: Deadly secrets, corporate corruption, and one man's search for justice*. Island Press.
- Gillezeau, C., Van Gerwen, M., Shaffer, R. M., Rana, I., Zhang, L., Sheppard, L., & Taioli, E. (2019). The evidence of human exposure to glyphosate: A review. *Environmental Health*, 18(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0435-5>

- Goldschmidt, R. (1943). *La base material para la evolución* (1ª). Espasa Calpe.
- González Reyes, L. (2020). *Colapso del capitalismo global y transiciones hacia sociedades ecomunitarias*. Manu Robles-Arangiz Instituta Fundazioa.
- Griffiths, B. S., Ritz, K., Bardgett, R. D., Cook, R., Christensen, S., Ekelund, F., Sørensen, S. J., Bååth, E., Bloem, J., De Ruiter, P. C., Dolfing, J., & Nicolardot, B. (2000). Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: An examination of the biodiversity–ecosystem function relationship. *Oikos*, 90(2), 279-294. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900208.x>
- Grunewald, W., & Bury, J. (2013). Comment on “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize” by Séralini et al. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 447-448. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.051>
- Grunewald, W., & Bury, J. (2015). *The GMO Revolution*. LannooCampus Publishers.
- Guilherme, S., Santos, M. A., Gaivão, I., & Pacheco, M. (2014a). ADN and chromosomal damage induced in fish (*Anguilla anguilla* L.) by aminomethylphosphonic acid (AMPA)—The major environmental breakdown product of glyphosate. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(14), 8730-8739. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2803-1>
- Guilherme, S., Santos, M. A., Gaivão, I., & Pacheco, M. (2014b). ADN and chromosomal damage induced in fish (*Anguilla anguilla* L.) by aminomethylphosphonic acid (AMPA)—The major environmental breakdown product of glyphosate. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(14), 8730-8739. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2803-1>
- Gutierrez, M. F., Battauz, Y., & Caisso, B. (2017). Disruption of the hatching dynamics of zooplankton egg banks due to glyphosate application. *Chemosphere*, 171, 644-653. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.110>
- Hale, C. (2007). *Earthworms of the Great Lakes* (First edition). Kollath+Stensaas.
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörrn, T., Goulson, D., & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- Hammond, B., Goldstein, D. A., & Saltmiras, D. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.044>
- Han, A. P. (2017, agosto 10). Unearthed emails: Monsanto connected to campaign to retract GMO paper. *Retraction Watch*. <https://retractionwatch.com/2017/08/10/unearthed-docs-monsanto-connected-campaign-retract-gmo-paper/>
- Hardell, L., Carlberg, M., Nordström, M., & Eriksson, M. (2023). Exposure to phenoxyacetic acids and glyphosate as risk factors for non-Hodgkin lymphoma—pooled analysis of three Swedish case-control studies including the sub-type hairy cell leukemia. *Leukemia & Lymphoma*, 64(5), 997-1004. <https://doi.org/10.1080/10428194.2023.2190434>

- Heap, I., & Duke, S. O. (2018). Overview of glyphosate-resistant weeds worldwide. *Pest Management Science*, 74(5), 1040-1049. <https://doi.org/10.1002/ps.4760>
- Hébert, M., Fugère, V., & Gonzalez, A. (2019). The overlooked impact of rising glyphosate use on phosphorus loading in agricultural watersheds. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(1), 48-56. <https://doi.org/10.1002/fee.1985>
- Heinemann, J. (2024, mayo 2). *Democracy falters when universities are afraid to speak truth to power*. The Press. <https://www.thepress.co.nz/nz-news/350265005/democracy-falters-when-universities-are-afraid-speak-truth-power>
- Heinemann, J. A. (2013). Food and chemical toxicology. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 442. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.055>
- Helander, M., Saloniemi, I., Omacini, M., Druille, M., Salminen, J.-P., & Saikkonen, K. (2018). Glyphosate decreases mycorrhizal colonization and affects plant-soil feedback. *Science of The Total Environment*, 642, 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.377>
- Helander, M., Saloniemi, I., & Saikkonen, K. (2012). Glyphosate in northern ecosystems. *Trends in Plant Science*, 17(10), 569-574. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.05.008>
- Herbert, F. (with Santos, D., & Tejera Expósito, D.). (2021). *Dune* (1ª ed., 8ª reimp). Debolsillo.
- Hernández, K., & Pérez, F. (2020). *El glifosato, una plaga para la salud de nuestros ríos, el medioambiente y las personas*. Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/147601>
- Hernández, K., & Pérez, F. (2021). *Contaminación por glifosato en el medio acuático*. Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/179436/>
- Hokanson, R., Fudge, R., Chowdhary, R., & Busbee, D. (2007). Alteration of estrogen-regulated gene expression in human cells induced by the agricultural and horticultural herbicide glyphosate. *Human & Experimental Toxicology*, 26(9), 747-752. <https://doi.org/10.1177/0960327107083453>
- Holland, N., Robinson, C., & Harbinson, R. (2012, febrero). *Conflicts on the menu. A decade of industry influence at the European Food Safety Agency*. Corporate Europe Observatory & Earth Open Source. https://corporateeurope.org/sites/default/files/publications/conflicts_on_the_menu_final_0.pdf
- Honeycutt, Z., & Rowlands, H. (2014). *Glyphosate Testing Report: Findings in American Mothers' Breast Milk, Urine and Water* (p. 19). <https://www.gentechvrij.nl/wp-content/uploads/2018/09/Gly-testing-rapport-MOMS-18.pdf>
- Hopkins, M. (2017, agosto 1). Bayer y Rothamsted Research firman un acuerdo marco estratégico. *Conferencia del Sudeste Asiático*. <https://www.agribusinessglobal.com/es/agrochemicals/bayer-rothamsted-research-sign-estrategico-marco-acuerdo/>
- Horth, H., & Blackmore, K. (2009). *Survey of glyphosate and AMPA in groundwaters and surface waters in Europe*. WRC report no. UC8073, 2.
- Howe, C. M., Berrill, M., Pauli, B. D., Helbing, C. C., Werry, K., & Veldhoen, N.

- (2004). Toxicity of glyphosate-based pesticides to four North American frog species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(8), 1928-1938. <https://doi.org/10.1897/03-71>
- Huntscha, S., Stravs, M. A., Bühlmann, A., Ahrens, C. H., Frey, J. E., Pomati, F., Hollender, J., Buerge, I. J., Balmer, M. E., & Poiger, T. (2018). Seasonal Dynamics of Glyphosate and AMPA in Lake Greifensee: Rapid Microbial Degradation in the Epilimnion During Summer. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4641-4649. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00314>
- IARC, I. A. for R. on C. (2015). IARC Monographs Volume 112: Evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides. *World Health Organization, Lyon*.
- Inglin, R. C. (2017). *Combined Phenotypic-Genotypic Analyses of the Genus Lactobacillus and Selection of Cultures for Biopreservation of Fermented Food* (p. 153 p.) [[object Object]: Application/pdf]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000214904>
- Jayasumana, C., Gunatilake, S., & Siribaddana, S. (2015). Simultaneous exposure to multiple heavy metals and glyphosate may contribute to Sri Lankan agricultural nephropathy. *BMC Nephrology*, 16(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s12882-015-0109-2>
- Ji, H., Xu, L., Wang, Z., Fan, X., & Wu, L. (2017). Differential microarn expression in the prefrontal cortex of mouse offspring induced by glyphosate exposure during pregnancy and lactation. *Experimental and Therapeutic Medicine*. <https://doi.org/10.3892/etm.2017.5669>
- Jiménez, J. (2016, marzo 9). *Glifosato: Verdades y mentiras del herbicida más vendido del mundo*. Xataka. <https://www.xataka.com/ecologia-y-naturaleza/glifosato-verdades-y-mentiras-del-herbicida-mas-vendido-del-mundo>
- Kamel, L., Keller-Pearson, M., Roux, C., & Ané, J. (2017). Biology and evolution of arbuscular mycorrhizal symbiosis in the light of genomics. *New Phytologist*, 213(2), 531-536. <https://doi.org/10.1111/nph.14263>
- Keefe, P. R. (2022). *El imperio del dolor: La historia secreta de la dinastía que reino en la industria farmacéutica* (Primera edición). Reservoir Books.
- Kelland, K. (2017, octubre 19). Glyphosate: WHO cancer agency edited out «non-carcinogenic» findings. *Reuters*. <http://www.reuters.com/investigates/special-report/who-iarc-glyphosate/>
- Kimura, M., Jia, Z.-J., Nakayama, N., & Asakawa, S. (2008). Ecology of viruses in soils: Past, present and future perspectives. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54(1), 1-32. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00197.x>
- Klátyik, S., Simon, G., Oláh, M., Mesnage, R., Antoniou, M. N., Zaller, J. G., & Székács, A. (2023). Terrestrial ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: Evidence from 2010–2023. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00758-9>
- Kremer, R., Means, N., & Kim, S. (2005). Glyphosate affects soybean root exudation and rhizosphere micro-organisms. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 85(15), 1165-1174. <https://doi.org/10.1080/03067310500273146>

- Krüger, M., Schledorn, P., Schrödl, W., Hoppe, H.-W., Lutz, W., & Shehata, A. A. (2014). Detection of Glyphosate Residues in Animals and Humans. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 04(02). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000210>
- Kurenbach, B., Marjoshi, D., Amábile-Cuevas, C. F., Ferguson, G. C., Godsoe, W., Gibson, P., & Heinemann, J. A. (2015). Sublethal Exposure to Commercial Formulations of the Herbicides Dicamba, 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid, and Glyphosate Cause Changes in Antibiotic Susceptibility in *Escherichia coli* and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *mBio*, 6(2), e00009-15. <https://doi.org/10.1128/mBio.00009-15>
- Kuz'min, S. V., Rakitskii, V. N., Bagreev, A. U., & Tsatsakis, A. (2024). Evaluation of the combined action of chlorsulfuron and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Public Health and Toxicology*, 4(1). <https://doi.org/10.18332/pht/177492>
- Laitinen, P., Rämö, S., & Siimes, K. (2007). Glyphosate translocation from plants to soil – does this constitute a significant proportion of residues in soil? *Plant and Soil*, 300(1-2), 51-60. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9387-1>
- Lajmanovich, R. C., Sandoval, M. T., & Peltzer, P. M. (2003). Induction of Mortality and Malformation in *Scinax nasicus* Tadpoles Exposed to Glyphosate Formulations. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(3), 612-618. <https://doi.org/10.1007/s00128-003-0029-x>
- Lampi, P., Hakulinen, T., Luostarinen, T., Pukkala, E., & Teppo, L. (1992). Cancer Incidence Following Chlorophenol Exposure in a Community in Southern Finland. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 47(3), 167-175. <https://doi.org/10.1080/00039896.1992.9938346>
- Lancet, T. (1999). Health risks of genetically modified foods. *The Lancet*, 353(9167), 1811. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(99\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(99)00093-8)
- Langiano, V. D. C., & Martinez, C. B. R. (2008). Toxicity and effects of a glyphosate-based herbicide on the Neotropical fish *Prochilodus lineatus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 147(2), 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2007.09.009>
- Langridge, P. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 441. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.056>
- Le Tien, D., & Le Huy, H. (2013). Comments on “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize”. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 443-444. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.054>
- Leber, J. (2012, septiembre 11). *La sequía pone a prueba el maíz modificado genéticamente*. MIT Technology Review. <http://www.technologyreview.es/s/2972/la-sequia-pone-prueba-el-maiz-modificado-geneticamente>
- Leponiemi, M., Schultner, E., Dickel, F., & Freitak, D. (2022). Chronic sublethal pesticide exposure affects brood production, morphology and endosymbionts, but not immunity in the ant, *Cardiocondyla obscurior*. *Ecological Entomology*, 47(3), 273-283. <https://doi.org/10.1111/een.13111>
- Levin, S. (2019, septiembre 8). Revealed: How Monsanto's 'intelligence center'

- targeted journalists and activists. *The Guardian*. <https://amp.theguardian.com/business/2019/aug/07/monsanto-fusion-center-journalists-roundup-neil-young>
- Lewontin, R. (2009). La evolución. *Ciencias*, 001. <https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/10897>
- Li, M.-H., Ruan, L.-Y., Zhou, J.-W., Fu, Y.-H., Jiang, L., Zhao, H., & Wang, J.-S. (2017). Metabolic profiling of goldfish (*Carassius auratus*) after long-term glyphosate-based herbicide exposure. *Aquatic Toxicology*, 188, 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.05.004>
- Linz, G. M., Blixt, D. G., Bergman, D. L., & Bleier, W. J. (1996). Responses of Red-Winged Blackbirds, Yellow-Headed Blackbirds and Marsh Wrens to Glyphosate-Induced Alterations in Cattail Density. *Journal of Field Ornithology*, 67(1), 167-176.
- Liphadzi, K. B., Al-Khatib, K., Bensch, C. N., Stahlman, P. W., Dille, J. A., Todd, T., Rice, C. W., Horak, M. J., & Head, G. (2005). Soil microbial and nematode communities as affected by glyphosate and tillage practices in a glyphosate-resistant cropping system. *Weed Science*, 53(4), 536-545. <https://doi.org/10.1614/WS-04-129R1>
- Lodish, H. F. (Ed.). (2008). *Molecular cell biology* (6th ed). W.H. Freeman.
- Lotter, D. W. (2003). Organic Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 21(4), 59-128. https://doi.org/10.1300/J064v21n04_06
- Louaillier, K. L. & B., & McKibben, B. (2015, octubre 8). *Grandes petroleras, grandes tabacaleras, grandes mentiras* | by Kelle Louaillier & Bill McKibben. Project Syndicate. <https://www.project-syndicate.org/commentary/exxonmobil-scandal-climate-policy-by-kelle-louaillier-and-bill-mckibben-2015-10/spanish>
- Madani, N. A., & Carpenter, D. Q. (2022). Effects of glyphosate and glyphosate-based herbicides like RoundupTM on the mammalian nervous system: A review. *Environmental Research*, 214, 113933. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113933>
- Malkin, S. (2018, mayo 31). *Academics Review: The Making of a Monsanto Front Group*. U.S. Right to Know. <https://usrtk.org/pesticides/academics-review-the-making-of-a-monsanto-front-group/>
- Mancini, F., Cooke, R., Woodcock, B. A., Greenop, A., Johnson, A. C., & Isaac, N. J. B. (2023). Invertebrate biodiversity continues to decline in cropland. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290(2000), 20230897. <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.0897>
- Margulis, L., & Barreno, E. (2003). Looking at lichens. *BioScience*, 53(8), 776. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0776:LAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0776:LAL]2.0.CO;2)
- Marks, S. (2017, noviembre 2). *Monsanto accused of ignoring relevant scientific data on glyphosate*. POLITICO. <https://www.politico.eu/article/glyphosate-monsanto-accused-of-ignoring-relevant-scientific-data/>
- Martín, R., Miquel, S., Ulmer, J., Kechaou, N., Langella, P., & Bermúdez-Humarán, L. G. (2013). Role of commensal and probiotic bacteria in human health: A focus on inflammatory bowel disease. *Microbial Cell Factories*, 12(1), 71. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-12-71>
- Matthews, J. (2001, octubre 11). Pro-GM Royal Society Fellow Shamed over

- Unfounded Allegations. *Science in Society Magazine*. <https://www.i-sis.org.uk/Trewavas.php>
- Mbatyoti, A., Daneel, M. S., Swart, A., De Waele, D., & Fourie, H. (2018). Terrestrial Non-Parasitic Nematode Assemblages associated With Glyphosate-tolerant and Conventional Soybean-Based Cropping Systems. *Journal of Nematology*, 50(3), 243-260. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2018-028>
 - McGuire, M. K., McGuire, M. A., Price, W. J., Shafii, B., Carrothers, J. M., Lackey, K. A., Goldstein, D. A., Jensen, P. K., & Vicini, J. L. (2016). Glyphosate and aminomethylphosphonic acid are not detectable in human milk. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 103(5), 1285-1290. <https://doi.org/10.3945/ajcn.115.126854>
 - McKeown, T. (1990). *Los orígenes de las enfermedades humanas*. Crítica.
 - McVey, K. A., Snapp, I. B., Johnson, M. B., Negga, R., Pressley, A. S., & Fitsanakis, V. A. (2016). Exposure of *C. elegans* eggs to a glyphosate-containing herbicide leads to abnormal neuronal morphology. *Neurotoxicology and Teratology*, 55, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2016.03.002>
 - Meadows, D. H. (with Blasco, J.). (2022). *Pensar en sistemas: Un manual de iniciación*. Capitan Swing.
 - Melero, Y., Stefanescu, C., & Pino, J. (2016). General declines in Mediterranean butterflies over the last two decades are modulated by species traits. *Biological Conservation*, 201, 336-342. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.029>
 - Meloni, F., Satta, G., Padoan, M., Montagna, A., Pilia, I., Argiolas, A., Piro, S., Magnani, C., Gambelunghe, A., Muzi, G., Ferri, G. M., Vimercati, L., Zanotti, R., Scarpa, A., Zucca, M., De Matteis, S., Campagna, M., Miligi, L., & Cocco, P. (2021). Occupational exposure to glyphosate and risk of lymphoma: results of an Italian multicenter case-control study. *Environmental Health*, 20(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00729-8>
 - Mercurio, P., Flores, F., Mueller, J. F., Carter, S., & Negri, A. P. (2014). Glyphosate persistence in seawater. *Marine Pollution Bulletin*, 85(2), 385-390. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.021>
 - Mesnage, R., & Antoniou, M. N. (2020). Computational modelling provides insight into the effects of glyphosate on the shikimate pathway in the human gut microbiome. *Current Research in Toxicology*, 1, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.crtox.2020.04.001>
 - Mesnage, R., Nepka, C., Ferguson, S., Kouretas, D., Stivaktakis, P. D., Calina, D., Tsatsakis, A. M., Antoniou, M., & Docea, A. O. (2023). The GlyphoMix protocol: Multiorgan changes in rats caused by prenatal exposure to glyphosate or its mixture with 2,4-D and dicamba. *Public Health Toxicology*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.18332/pht/161987>
 - Mesnage, R., Teixeira, M., Mandrioli, D., Falcioni, L., Ducarmon, Q. R., Zwitterink, R. D., Mazzacava, F., Caldwell, A., Halket, J., Amiel, C., Panoff, J.-M., Belpoggi, F., & Antoniou, M. N. (2021). Use of Shotgun Metagenomics and Metabolomics to Evaluate the Impact of Glyphosate or Roundup MON 52276 on the Gut Microbiota and Serum

- Metabolome of Sprague-Dawley Rats. *Environmental Health Perspectives*, 129(1), 017005. <https://doi.org/10.1289/EHP6990>
- Mink, P. J., Mandel, J. S., Scurman, B. K., & Lundin, J. I. (2012). Epidemiologic studies of glyphosate and cancer: A review. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 63(3), 440-452. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.05.012>
 - Mirande, L., Haramboure, M., Smagghe, G., Pineda, S., & Schneider, M. I. (2010). Side-effects of glyphosate on the life parameters of eriopis connexa (coleoptera: Coccinellidae) in Argentina. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 75(3), 367-372.
 - Morowati, M. (2000). Histochemical and histopathological study of the intestine of the earthworm (*Pheretima elongata*) exposed to a field dose of the herbicide glyphosate. *The Environmentalist*, 20(2), 105-111. <https://doi.org/10.1023/A:1006704009184>
 - Motta, E. V. S., & Moran, N. A. (2024). The honeybee microbiota and its impact on health and disease. *Nature Reviews Microbiology*, 22(3), 122-137. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00990-3>
 - Motta, E. V. S., Raymann, K., & Moran, N. A. (2018). Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(41), 10305-10310. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803880115>
 - Mousseau, D., & Devillers, E. (2023). *Guerre et spoliation: La prise de controle des terres agricoles ukrainiennes*. The Oakland Institute. <https://www.oaklandinstitute.org/sites/oaklandinstitute.org/files/guerre-et-spoliation.pdf>
 - *Movimientos agrarios transnacionales: Historia, organización y políticas de lucha* (Primera edición: febrero de 2018) (with Edelman, M., Borras, S. M., Colque Fernández, G., & Soria Galvarro, F.). (2018). Icaria Editorial.
 - Muñoz, J. P., Bleak, T. C., & Calaf, G. M. (2021). Glyphosate and the key characteristics of an endocrine disruptor: A review. *Chemosphere*, 270, 128619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128619>
 - Muñoz-de-Toro, M., Markey, C. M., Wadia, P. R., Luque, E. H., Rubin, B. S., Sonnenschein, C., & Soto, A. M. (2005). Perinatal Exposure to Bisphenol-A Alters Peripubertal Mammary Gland Development in Mice. *Endocrinology*, 146(9), 4138-4147. <https://doi.org/10.1210/en.2005-0340>
 - Nadeau, P., Thibault, M., Horgan, F., Michaud, J., Gandiaga, F., Comeau, C., & Moreau, G. (2015). Decaying matters: Coleoptera involved in heterotrophic systems. En *Beetles: Biodiversity, Ecology and Role in the Environment* (pp. 123-174).
 - Nations, F. A. A. O. O. T. U. (2009). *La larga sombra del ganado: Problemas ambientales y opciones*. Food & Agriculture Organi.
 - Negga, R., Rudd, D. A., Davis, N. S., Justice, A. N., Hatfield, H. E., Valente, A. L., Fields, A. S., & Fitsanakis, V. A. (2011). Exposure to Mn/Zn ethylene-bis-dithiocarbamate and glyphosate pesticides leads to neurodegeneration in *Caenorhabditis elegans*. *Neurotoxicology*, 32(3), 331-341. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2011.02.002>
 - Newman, J. R., Powers, S. J., Kaur, P., & Caswell, B. (2002). *Confidential report to*

- Monsanto [Text]. <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8944x/confidential-report-to-monsanto>
- Newman, M. M., Hoilett, N., Lorenz, N., Dick, R. P., Liles, M. R., Ramsier, C., & Kloepper, J. W. (2016). Glyphosate effects on soil rhizosphere-associated bacterial communities. *Science of The Total Environment*, 543, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.008>
 - Newman, M. M., Lorenz, N., Hoilett, N., Lee, N. R., Dick, R. P., Liles, M. R., Ramsier, C., & Kloepper, J. W. (2016). Changes in rhizosphere bacterial gene expression following glyphosate treatment. *Science of The Total Environment*, 553, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.078>
 - Noor-Ul, H., Haokun, L., Junyan, J., Xiaoming, Z., Dong, H., Yunxia, Y., & Shouqi, X. (2020). Dietary supplementation of *Geotrichum candidum* improves growth, gut microbiota, immune-related gene expression and disease resistance in gibel carp CAS (*Carassius auratus gibelio*). *Fish & Shellfish Immunology*, 99, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.02.001>
 - Nosanchuk, J. D., Ovalle, R., & Casadevall, A. (2001). Glyphosate Inhibits Melanization of *Cryptococcus neoformans* and Prolongs Survival of Mice after Systemic Infection. *The Journal of Infectious Diseases*, 183(7), 1093-1099. <https://doi.org/10.1086/319272>
 - Novotny, E. (2022). Glyphosate, Roundup and the Failures of Regulatory Assessment. *Toxics*, 10(6), 321. <https://doi.org/10.3390/toxics10060321>
 - O'Brien, S. L., Gibbons, S. M., Owens, S. M., Hampton-Marcell, J., Johnston, E. R., Jastrow, J. D., Gilbert, J. A., Meyer, F., & Antonopoulos, D. A. (2016). Spatial scale drives patterns in soil bacterial diversity. *Environmental Microbiology*, 18(6), 2039-2051. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13231>
 - Oliveira, A. G., Telles, L. F., Hess, R. A., Mahecha, G. A. B., & Oliveira, C. A. (2007). Effects of the herbicide Roundup on the epididymal region of drakes *Anas platyrhynchos*. *Reproductive Toxicology*, 23(2), 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2006.11.004>
 - Ollivier, L. (2013). A Comment on "Séralini, G.-E., et al., Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food Chem. Toxicol.* (2012)," <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2012.08.005>. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 458. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.045>
 - Omran, N. E., & Salama, W. M. (2016). The endocrine disruptor effect of the herbicides atrazine and glyphosate on *Biomphalaria alexandrina* snails. *Toxicology and Industrial Health*, 32(4), 656-665. <https://doi.org/10.1177/0748233713506959>
 - OMS. (2020). *Resistencia a los antibióticos*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance>
 - Paganelli, A., Gnazzo, V., Acosta, H., López, S. L., & Carrasco, A. E. (2010). Glyphosate-Based Herbicides Produce Teratogenic Effects on Vertebrates by Impairing Retinoic Acid Signaling. *Chemical Research in Toxicology*, 23(10), 1586-1595. <https://doi.org/10.1021/tx1001749>

- Panchin, A. Y. (2013). Toxicity of roundup-tolerant genetically modified maize is not supported by statistical tests. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 475. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.039>
- Panchin, A. Y., & Tuzhikov, A. I. (2017). Published GMO studies find no evidence of harm when corrected for multiple comparisons. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(2), 213-217. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1130684>
- Paradoja de Jevons, L. (2021, septiembre 20). *¿Es la experimentación animal una tortura necesaria?* www.elsaltodiario.com. <https://www.elsaltodiario.com/paradoja-jevons-ciencia-poder/es-la-experimentacion-animal-una-tortura-necesaria>
- Perego, M. C., Schutz, L. F., Caloni, F., Cortinovis, C., Albonico, M., & Spicer, L. J. (2017). Evidence for direct effects of glyphosate on ovarian function: Glyphosate influences steroidogenesis and proliferation of bovine granulosa but not theca cells *in vitro*: Glyphosate effects on bovine granulosa. *Journal of Applied Toxicology*, 37(6), 692-698. <https://doi.org/10.1002/jat.3417>
- Pereira, J. L., Araujo, T. A., Rodrigues-Silva, N., Silva, A. A., & Picanço, M. C. (2018). Edaphic Entomofauna variation depending on glyphosate application in roundup ready soybean crops. *Planta Daninha*, 36, e018171328.
- Peretó, J. (2020, julio 25). Rosalind Franklin, més enllà de la llegenda. *Revista Mètode*. <https://metode.cat/noticies/rosalind-franklin-mes-enlla-de-la-llegenda.html>
- Pérez Espinazo, S. (2021). *Cambios en la abundancia de la abeja europea (Apis mellifera)*.
- Pérez, G. L., Vera, M. S., & Miranda, L. A. (2011). Effects of herbicide glyphosate and glyphosate-based formulations on aquatic ecosystems. En *Herbicides and Environment* (Vol. 16, pp. 343-368). IntechOpen.
- Philipp Schledorn, M. K. (2014). Detection of Glyphosate Residues in Animals and Humans. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 04(02). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000210>
- Pilu, R. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 454. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.048>
- Pollack, A. (2016, abril 13). Acreage for Genetically Modified Crops Declined in 2015. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2016/04/13/business/acreage-for-genetically-modified-crops-declined-in-2015.html>
- Ponisio, L. C., M'Gonigle, L. K., Mace, K. C., Palomino, J., De Valpine, P., & Kremen, C. (2015). Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1799), 20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>
- Portier, C. J., Armstrong, B. K., Baguley, B. C., Baur, X., Belyaev, I., Bellé, R., Belpoggi, F., Biggeri, A., Bosland, M. C., Bruzzi, P., Budnik, L. T., Bugge, M. D., Burns, K., Calaf, G. M., Carpenter, D. O., Carpenter, H. M., López-Carrillo, L., Clapp, R., Cocco, P., ... Zhou, S.-F. (2016). Differences in the carcinogenic evaluation of glyphosate

- between the International Agency for Research on Cancer (IARC) and the European Food Safety Authority (EFSA). *J Epidemiol Community Health*, 70(8), 741-745. <https://doi.org/10.1136/jech-2015-207005>
- *Présence de pesticides dans l'eau au Québec: Portrait et tendances dans les zones de maïs et de soya 2011 à 2014* (with Giroux, I., Pelletier, L., & Auteuil-Potvin, F. d'). (2015). Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques.
 - Puigbò, P., Leino, L. I., Rainio, M. J., Saikkonen, K., Saloniemi, I., & Helander, M. (2022). Does Glyphosate Affect the Human Microbiota? *Life*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/life12050707>
 - Pusztai, A. (2002). GM food safety: Scientific and institutional issues. *Science as Culture*, 11(1), 69-92.
 - Quist, D., & Chapela, I. H. (2001). Transgenic ADN introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature*, 414(6863), 541-543. <https://doi.org/10.1038/35107068>
 - Randerson, J. (2008, enero 15). Arpad Pusztai: Biological divide. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/education/2008/jan/15/academicexperts.higher-educationprofile>
 - Raup, D. M. (1977). Probabilistic Models in Evolutionary Paleobiology: A random walk through the fossil record produces some surprising results. *American Scientist*, 65(1), 50-55.
 - Redacción. (2001, octubre 8). Greenpeace wins damages over professor's «unfounded» allegations. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/education/2001/oct/08/research.highereducation>
 - Relyea, R. A. (2012). New effects of Roundup on amphibians: Predators reduce herbicide mortality; herbicides induce antipredator morphology. *Ecological Applications*, 22(2), 634-647. <https://doi.org/10.1890/11-0189.1>
 - Rendon-von Osten, J., & Dzul-Caamal, R. (2017). Glyphosate Residues in Groundwater, Drinking Water and Urine of Subsistence Farmers from Intensive Agriculture Localities: A Survey in Hopelchén, Campeche, Mexico. *Intearntional Jouarnl of Environmental Research and Public Health*, 14(6), 595. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060595>
 - Reno, U., Doyle, S. R., Momo, F. R., Regalado, L., & Gagneten, A. M. (2018). Effects of glyphosate formulations on the population dynamics of two freshwater cladoceran species. *Ecotoxicology*, 27(7), 784-793. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1891-3>
 - Roberge, J., & Angelstam, P. (2004). Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool. *Conservation Biology*, 18(1), 76-85. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x>
 - Rodríguez-Rey, Noris-García, E., & Fundora Torres, M. T. (2016). Principios y relevancia del ensayo cometa. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(2), 184-194.

- Romano, R. M., Romano, M. A., Bearndi, M. M., Furtado, P. V., & Oliveira, C. A. (2010). Prepubertal exposure to commercial formulation of the herbicide glyphosate alters testosterone levels and testicular morphology. *Archives of Toxicology*, 84(4), 309-317. <https://doi.org/10.1007/s00204-009-0494-z>
- Rosset, V., Angélibert, S., Arthaud, F., Bornette, G., Robin, J., Wezel, A., Vallod, D., & Oertli, B. (2014). Is eutrophication really a major impairment for small waterbody biodiversity? *Jouarnl of Applied Ecology*, 51(2), 415-425. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12201>
- Rouquié, D., & Clarisse, Y. (2019, mayo 10). Des personnalités françaises fichées par Monsanto-presse. *Reuters*. <https://www.reuters.com/article/france-pesticides-monsanto-idFRL5N22M1ZG/>
- Roy, N. M., Ochs, J., Zambrzycka, E., & Anderson, A. (2016). Glyphosate induces cardiovascular toxicity in Danio rerio. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 46, 292-300. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2016.08.010>
- Rutgers, M., Orgiazzi, A., Gardi, C., Römbke, J., Jänsch, S., Keith, A. M., Neilson, R., Boag, B., Schmidt, O., Murchie, A. K., Blackshaw, R. P., Pérès, G., Cluzeau, D., Guernion, M., Briones, M. J. I., Rodeiro, J., Piñeiro, R., Cosín, D. J. D., Sousa, J. P., ... Zwart, D. D. (2016). Mapping earthworm communities in Europe. *Applied Soil Ecology*, 97, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.015>
- Sabini Fernández, L. E. (2017, febrero 22). Occidente y Eurasia: Una «esquizofrenia» transgénica. *Revista Futuros*. <https://revistafuturos.noblogs.org/2017/02/occidente-y-eurosia-una-esquizofrenia-transgenica/>
- Sabio Y García, C. A., Schiaffino, M. R., Lozano, V. L., Vera, M. S., Ferraro, M., Izaguirre, I., & Pizarro, H. (2020). New findings on the effect of glyphosate on autotrophic and heterotrophic picoplankton structure: A microcosm approach. *Aquatic Toxicology*, 222, 105463. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105463>
- Sammons, R. D., & Gaines, T. A. (2014). Glyphosate resistance: State of knowledge. *Pest Management Science*, 70(9), 1367-1377. <https://doi.org/10.1002/ps.3743>
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. G. (2021). Further evidence for a global decline of the entomofauna. *Austral Entomology*, 60(1), 9-26. <https://doi.org/10.1111/aen.12509>
- Sanders, D., Kamoun, S., Williams, B., & Festing, M. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 450-453. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.049>
- Santillo, D. J., Brown, P. W., & Leslie, D. M. (1989). Response of Songbirds to Glyphosate-Induced Habitat Changes on Clearcuts. *The Jouarnl of Wildlife Management*, 53(1), 64. <https://doi.org/10.2307/3801307>
- Santos, A. M. D., Bessa, L. A., Augusto, D. S. S., Vasconcelos Filho, S. C., Batista, P. F., & Vitorino, L. C. (2023). Biomarkers of pollution by glyphosate in the lichens, *Parmotrema tinctorium* and *Usnea barbata*. *Brazilian Jouarnl of Biology*, 83, e273069. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.273069>

- Scahill, J. (2010, octubre 4). Blackwater's Black Ops. Intearnl documents reveal the firm's clandestine work for multinationals and governments. *The Nation*. <https://www.thenation.com/article/archive/blackwaters-black-ops/>
- Schneider, M. I., Sanchez, N., Pineda, S., Chi, H., & Ronco, A. (2009). Impact of glyphosate on the development, fertility and demography of *Chrysoperla exteartn* (Neuroptera: Chrysopidae): Ecological approach. *Chemosphere*, 76(10), 1451-1455. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.05.029>
- Schorch, F. (2013). President's Column. The 20th Anniversary of the "Classic Examples in Toxicologic Pathology" at Hannover: The reasons of the success of this course and the benefit for our society. *ESTP Newsletter*, 1. https://www.eurotoxpath.org/organization/newsletter2013_1.pdf
- Schuette, J. (1998). Environmental fate of glyphosate. *Environmental Monitoring & Pest Management*, 1(1), 1-13.
- Séralini, G.-É. (2022). *Los papeles de Monsanto: El escándalo del caso Roundup*.
- Séralini, G.-É., Clair, E., Mesnage, R., Gress, S., Defarge, N., Malatesta, M., Hennequin, D., & de Vendômois, J. S. (2012). RETRACTED: Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food and Chemical Toxicology*, 50(11), 4221-4231. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.08.005>
- Séralini, G.-É., Clair, E., Mesnage, R., Gress, S., Defarge, N., Malatesta, M., Hennequin, D., & De Vendômois, J. S. (2014). Republished study: Long-term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Environmental Sciences Europe*, 26(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0014-5>
- Séralini, G.-É., Mesnage, R., Defarge, N., Gress, S., Hennequin, D., Clair, E., Malatesta, M., & De Vendômois, J. S. (2013). Answers to critics: Why there is a long term toxicity due to a Roundup-tolerant genetically modified maize and to a Roundup herbicide. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 476-483. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.11.007>
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232. <https://doi.org/10.1038/nature11069>
- Shreiner, A. B., Kao, J. Y., & Young, V. B. (2015). The gut microbiome in health and in disease: *Current Opinion in Gastroenterology*, 31(1), 69-75. <https://doi.org/10.1097/MOG.0000000000000139>
- Silva, V., Montanarella, L., Jones, A., Fernández-Ugalde, O., Mol, H. G. J., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2018). Distribution of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in agricultural topsoils of the European Union. *Science of The Total Environment*, 621, 1352-1359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.093>
- Silvers, R. B. (Ed.). (1996). *Historias de la ciencia y del olvido* (1ª). Siruela.
- Šiviková, K., & Dianovský, J. (2006). Cytogenetic effect of technical glyphosate on cultivated bovine peripheral lymphocytes. *Intearntional Jouarnl of Hygiene and Environmental Health*, 209(1), 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.07.005>
- Smedbol, É., Gomes, M. P., Paquet, S., Labrecque, M., Lepage, L., Lucotte, M., &

- Juneau, P. (2018). Effects of low concentrations of glyphosate-based herbicide factor 540° on an agricultural stream freshwater phytoplankton community. *Chemosphere*, 192, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.128>
- Smith, D. F. Q., Camacho, E., Thakur, R., Barron, A. J., Dong, Y., Dimopoulos, G., Broderick, N. A., & Casadevall, A. (2021). Glyphosate inhibits melanization and increases susceptibility to infection in insects. *PLOS Biology*, 19(5), e3001182. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001182>
- Sparling, D. W., Matson, C., Bickham, J., & Doelling-Brown, P. (2006). Toxicity of glyphosate as Glypro® and LI700 to red-eared slider (*Trachemys scripta elegans*) embryos and early hatchlings. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(10), 2768-2774. <https://doi.org/10.1897/05-152.1>
- Spinelli, V., Ceci, A., Dal Bosco, C., Gentili, A., & Persiani, A. M. (2021). Glyphosate-Eating Fungi: Study on Fungal Saprotrophic Strains' Ability to Tolerate and Utilise Glyphosate as a Nutritional Source and on the Ability of *Purpureocillium lilacinum* to Degrade It. *Microorganisms*, 9(11), 2179. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112179>
- Spribile, T., Tuovinen, V., Resl, P., Vanderpool, D., Wolinski, H., Aime, M. C., Schneider, K., Stabenheimer, E., Toome-Heller, M., Thor, G., Mayrhofer, H., Johannesson, H., & McCutcheon, J. P. (2016). Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. *Science*, 353(6298), 488-492. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8287>
- Springett, J. A., & Gray, R. A. J. (1992). Effect of repeated low doses of biocides on the earthworm *Aporrectodea caliginosa* in laboratory culture. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(12), 1739-1744. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90180-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90180-6)
- Sritana, N., Suriyo, T., Kanitwithayanun, J., Songvasin, B. H., Thiantanawat, A., & Satayavivad, J. (2018). Glyphosate induces growth of estrogen receptor alpha positive cholangiocarcinoma cells via non-genomic estrogen receptor/ERK1/2 signaling pathway. *Food and Chemical Toxicology*, 118, 595-607. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.06.014>
- Stahlschmidt, Z. R., Whitlock, J., Vo, C., Evalen, P., & D. B. (2022). Pesticides in a warmer world: Effects of glyphosate and warming across insect life stages. *Environmental Pollution*, 307, 119508. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119508>
- Stur, E., Aristizabal-Pachon, A. F., Peronni, K. C., Agostini, L. P., Waigel, S., Chariker, J., Miller, D. M., Thomas, S. D., Rezzoug, F., Detogni, R. S., Reis, R. S. D., Silva Junior, W. A., & Louro, I. D. (2019). Glyphosate-based herbicides at low doses affect canonical pathways in estrogen positive and negative breast cancer cell lines. *PLOS ONE*, 14(7), e0219610. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219610>
- Suay-Cano, V. A., Tinaut, A., & Selfa, J. (2002). Las hormigas (Hymenoptera, Formicidae) asociadas a pulgones (Hemiptera, Aphididae) en la provincia de Valencia. *Graellsia*, 58(1), 21-37. <https://doi.org/10.3989/graeellsia.2002.v58.i1.264>
- Szekeres, D., Kádár, F., & Dorner, Z. (2008). *Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in transgenic herbicide tolerant maize hybrids: Impact of the transgenic crop or the weed control practice?*

- Tejerizo-López, L. C., Tejerizo-García, A., Nava, E., García-Robles, R. M., Sánchez Sánchez, M. M., Leiva, A., Morán, E., Corredera, F., Pérez-Escanilla, J. A., & Benavente, J. M. (2003). Embriopatía asociada a la isotretinoína. *Clínica e Investigación en Ginecología y Obstetricia*, 30(1), 27-36.
- Tester, M. (2009, julio 8). GM crops are another tool in the struggle against poverty. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/cif-green/2009/jul/08/gm-crops-poverty>
- Tester, M. (2013). Letter to the Editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 457. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.046>
- Thompson, J. N. (2003). *El proceso coevolutivo* (R. Elier, Trad.). Fondo de Cultura Económica.
- Torsvik, V., Øvreås, L., & Thingstad, T. F. (2002). Prokaryotic Diversity—Magnitude, Dynamics, and Controlling Factors. *Science*, 296(5570), 1064-1066. <https://doi.org/10.1126/science.1071698>
- Touza, L. L. (2023). *Los ciudadanos ante el cambio climático*.
- Townsend, J. M., Hall, C. A. S., Volk, T. A., Murphy, D., Ofezu, G., Powers, B., Quayle, A., & Serapiglia, M. (2014). Energy Return on Investment (EROI), Liquid Fuel Production, and Consequences for Wildlife. En J. E. Gates, D. L. Trauger, & B. Czech (Eds.), *Peak Oil, Economic Growth, and Wildlife Conservation* (pp. 29-61). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1954-3_2
- Tresnakova, N., Stara, A., & Velisek, J. (2021). Effects of Glyphosate and Its Metabolite AMPA on Aquatic Organisms. *Applied Sciences*, 11(19), 9004. <https://doi.org/10.3390/app11199004>
- Trewavas, A. (2002). Malthus foiled again and again. *Nature*, 418(6898), 668-670. <https://doi.org/10.1038/nature01013>
- Tribe, D. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 467-472. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.042>
- Tsui, M. T. K., & Chu, L. M. (2003). Aquatic toxicity of glyphosate-based formulations: Comparison between different organisms and the effects of environmental factors. *Chemosphere*, 52(7), 1189-1197. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00306-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00306-0)
- Turnbaugh, P. J., Ley, R. E., Mahowald, M. A., Magrini, V., Mardis, E. R., & Gordon, J. I. (2006). An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest. *Nature*, 444(7122), 1027-1031. <https://doi.org/10.1038/nature05414>
- Ulu, T. C., Sadic, B., & Susurluk, I. A. (2016). Effects of different pesticides on virulence and mortality of some entomopathogenic nematodes. *Invertebrate Survival Journal*, 13(1), 111-115.
- Vaccari, C., El Dib, R., Goma, H., Lopes, L. C., & de Camargo, J. L. (2019). Paraquat and Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 22(5-6), 172-202. <https://doi.org/10.1080/10937404.2019.1659197>
- Van Boeckel, T. P., Glennon, E. E., Chen, D., Gilbert, M., Robinson, T. P., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Bonhoeffer, S., & Laxminarayan, R. (2017). Reducing antimicrobial

- use in food animals. *Science*, 357(6358), 1350-1352. <https://doi.org/10.1126/science.aao1495>
- Vannini, A., Guarnieri, M., Paoli, L., Sorbo, S., Basile, A., & Loppi, S. (2016). Bioaccumulation, physiological and ultrastructural effects of glyphosate in the lichen *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. *Chemosphere*, 164, 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.058>
- Varona, M., Henao, G. L., Díaz, S., Lancheros, A., Murcia, A., Rodríguez, N., & Álvarez, V. H. (2009). Effects of aerial applications of the herbicide glyphosate and insecticides on human health. *Biomédica*, 29(3), 456-475.
- Vázquez, M. B., Moreno, M. V., Amodeo, M. R., & Bianchinotti, M. V. (2021). Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.10.005>
- Vellingiri, B., Chandrasekhar, M., Sri Sabari, S., Gopalakrishnan, A. V., Narayanasamy, A., Venkatesan, D., Iyer, M., Kesari, K., & Dey, A. (2022). Neurotoxicity of pesticides – A link to neurodegeneration. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 113972. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113972>
- Vendrell, E., Gómez De Barreda Ferraz, D., Sabater, C., & Carrasco, J. M. (2009). Effect of Glyphosate on Growth of Four Freshwater Species of Phytoplankton: A Microplate Bioassay. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(5), 538-542. <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9674-z>
- Verderame, M., & Scudiero, R. (2019). How Glyphosate Impairs Liver Condition in the Field Lizard *Podarcis siculus* (Rafinesque-Schmaltz, 1810): Histological and Molecular Evidence. *BioMed Research International*, 2019, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2019/4746283>
- Verrell, P., & Van Buskirk, E. (2004). As the Worm Turns: Eisenia fetida Avoids Soil Contaminated by a Glyphosate-Based Herbicide. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 72(2), 219-224. <https://doi.org/10.1007/s00128-003-9134-0>
- Vicini, J. L., Jensen, P. K., Young, B. M., & Swarthout, J. T. (2021). Residues of glyphosate in food and dietary exposure. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 5226-5257. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12822>
- Villarreal, V. R., Katusic, M. Z., Myers, S. M., Weaver, A. L., Nocton, J. J., & Voigt, R. G. (2024). Risk of Autoimmune Disease in Research-Identified Cases of Autism Spectrum Disorder: A Longitudinal, Population-Based Birth Cohort Study. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics: JDBP*, 45(1), e46-e53. <https://doi.org/10.1097/DBP.0000000000001232>
- VV.AA. (1999, febrero 12). Top researchers back suspended lab whistleblower. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/1999/feb/12/food.gm>
- Wagensberg, J. (2010). *Las raíces triviales de lo fundamental* (1a edición). Tusquets Editores.
- Wager, R. (2013). Letter to the editor. *Food and Chemical Toxicology*, 53, 455-456. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.047>

- Wager, R., & Miller, H. I. (2023, agosto 15). Greenpeace's Vile War on the Poor and Vulnerable. *European Scientist*. <https://www.europeanscientist.com/en/features/greenpeaces-vile-war-on-the-poor-and-vulnerable/>
- Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R., & Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2023989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023989118>
- Walsh, L., Hill, C., & Ross, R. P. (2023). Impact of glyphosate (RoundupTM) on the composition and functionality of the gut microbiome. *Gut Microbes*, 15(2), 2263935. <https://doi.org/10.1080/19490976.2023.2263935>
- Wang, C., Lin, X., Li, L., Lin, L., & Lin, S. (2017). Glyphosate Shapes a Dinoflagellate-Associated Bacterial Community While Supporting Algal Growth as Sole Phosphorus Source. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2530. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02530>
- Wang, X.-F., Li, S., Chou, A. P., & Bronstein, J. M. (2006). Inhibitory effects of pesticides on proteasome activity: Implication in Parkinson's disease. *Neurobiology of Disease*, 23(1), 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2006.02.012>
- Weidenmüller, A., Meltzer, A., Neupert, S., Schwarz, A., & Kleineidam, C. (2022). Glyphosate impairs collective thermoregulation in bumblebees. *Science*, 376(6597), 1122-1126. <https://doi.org/10.1126/science.abf7482>
- Werren, J. H., Windsor, D., & Guo, L. R. (1995). Distribution of Wolbachia among neotropical arthropods. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 262(1364), 197-204. <https://doi.org/10.1098/rspb.1995.0196>
- Wilkes, T. I., Warner, D. J., Davies, K. G., & Edmonds-Brown, V. (2020). Tillage, Glyphosate and Beneficial Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Optimising Crop Management for Plant-Fungal Symbiosis. *Agriculture*, 10(11), 520. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110520>
- Xiao, Z., Ying, W., Xing, Z., Zhihui, L., Qiuyu, Z., Caijiao, H., Changlong, L., Shi, H., Deng, L., Zhenwen, C., Jianquan, N., Xueyun, H., & Xiaoyan, D. (2024). Unexpected mutations occurred in CRISPR/Cas9 edited *Drosophila* analyzed by deeply whole genomic sequencing. *Heliyon*, 10(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29061>
- Yeates, G. W., Bongers, T., De Goede, R. G., Freckman, D. W., & Georgieva, S. S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 25(3), 315-331.
- Yu, S., Kim, T., Yoo, K. H., & Kang, K. (2017). The T47D cell line is an ideal experimental model to elucidate the progesterone-specific effects of a luminal A subtype of breast cancer. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 486(3), 752-758. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.03.114>
- Zalacain, M., Sierra-Sesúmagá, L., & Patiño, A. (2005). El ensayo de micronúcleos como medida de inestabilidad genética inducida por agentes genotóxicos. *Anales del sistema Sanitario de Navarra*, 28(2), 227-236.

- Zhang, L., Rana, I., Shaffer, R. M., Taioli, E., & Sheppard, L. (2019). Exposure to glyphosate-based herbicides and risk for non-Hodgkin lymphoma: A meta-analysis and supporting evidence. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 781, 186-206. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2019.02.001>
- Zhang, S., Xu, J., Kuang, X., Li, S., Li, X., Chen, D., Zhao, X., & Feng, X. (2017). Biological impacts of glyphosate on morphology, embryo biomechanics and larval behavior in zebrafish (*Danio rerio*). *Chemosphere*, 181, 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.094>
- Zobiolo, L. H. S., Kremer, R. J., Oliveira, R. S., & Constantin, J. (2011). Glyphosate affects micro-organisms in rhizospheres of glyphosate-resistant soybeans: Glyphosate affects micro-organisms in rhizospheres. *Journal of Applied Microbiology*, 110(1), 118-127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04864.x>
- Zoller, O., Rhyn, P., Zarn, J. A., & Dudler, V. (2020). Urine glyphosate level as a quantitative biomarker of oral exposure. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 228, 113526. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113526>

